



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MÉRIÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université des Frères Mentouri Constantine
Faculté des Sciences de la Nature et de la
Vie

جامعة الاخوة منتوري قسنطينة
كلية علوم الطبيعة و الحياة

Département : Microbiologie

قسم : الميكروبيولوجيا

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Ecologie et environnement

Spécialité : Écologie microbienne

Intitulé :

Revue bibliographique sur les biocarburants microbiens

Préparé par : CHAUCHE Boutheina

Le : 23/09/2021

HAMLAOUI Kenza

Jury d'évaluation :

Président du jury : Mr CHABBI R. (MAA- UFM Constantine1).

Rapporteur : Mme GUERGOURI I. (MAA- UFM Constantine1).

Examineurs : Mme GACI M. (MCB Constantine1).

Année universitaire

2020- 2021

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nous exprimons nos plus sincères gratitudee à Mme. GUERGOURI Ibtissem qui à accepté de diriger ce travail

Pour son soutien continu, pour les précieux conseils, suggestions et orientations qu'elle nous a donnés et aussi pour ses grands encouragements et la confiance qu'elle nous a accordée tout au long de notre travail.

Nous remercions très vivement Mr. CHABBI Rabeh qui nous a fait l'honneur de présider notre jury. Nos remerciements s'adressent également à Mme. GACI Meriem d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.

Nous adressons un infini remerciement à tous nos enseignants qui ont participé à notre formation.

Enfin à tous ceux qui ont bien apporté, de près ou de loin, leur part active à la réalisation de ce travail, ils trouvent ici, l'expression de notre profonde gratitude.

Dédicaces

Allah soit loué, dont la bonne grâce est faite.

*Je dédie ce travail à celui qui m'a toujours soutenu depuis le début de mon parcours académique qui m'a influencé sur elle-même ma tante **Yamna**.*

A mes chers parents, tant que vous m'avez sauvé, à ma mère, tant que votre étreinte est un refuge pour moi.

*Aux plus belles et merveilleuses sœurs, **Aya, Chaima et Khawla**, je vous aime tellement.*

*A ma source d'énergie et de joie, **mon très cher mari**, merci d'être dans ma vie.*

*A ceux que je considère comme mes parents Mon oncle **Zoubire** et ma tante **Houda**, tu as fait quelque chose de beau que je n'oublierai jamais.*

*A tous mes amis, surtout la copine qui a toujours été à mes côtés, **Soumia**.*

*A ma binôme **Kenza** merci pour tous les beaux moments.que nous avons passé ensemble.*

A tous ceux qui m'ont aidé à arriver ici, mes professeures Qu'Allah récompense.

Merci à tous

Je dédie ce modeste travail

A mon père. Je n'ai pas encore payé la dette de ta fatigue, et c'est ta motivation qui m'a permis d'arriver à ce stade.

Merci à celui qui s'est sacrifié jour et nuit pour m'assurer les bonnes conditions.

A ma chère mère affectueuse qui me rappelle toujours de prier pendant la nuit à qui je ne trouve aucun mot pour exprimer son soutien.

*A mes chers frères **Mohamed Walid** pour l'aide et les conseils qui m'a donné.*

*Et **Raouf** ma source d'espoir et motivation.*

*A mon oncle **Farouk** qui se tient toujours à mes côtés, merci mon deuxième père.*

*A **boutheina** ma cousine avant d'être ma binôme pour son amour et son encouragement.*

*A ma chère amie **nedjma** pour son encouragement.*

*A mes chères cousines (**keltoum, Zineb, aya, Meriem, chaima, khaoula et rokia**) qui m'ont toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études*

*A ma tante **Djahida** qui n'a jamais cessé de me soutenir*

*A **takoua** ma jolie princesse*

Résumé

Le biocarburant est une énergie durable issue de matière organique d'origine animale ou végétale. Il est considéré comme une énergie renouvelable produite en transformant la biomasse, qu'elle soit sous forme de céréales et de cultures agricoles comme le maïs, ou sous forme d'huiles comme l'huile de soja et l'huile de palme. Le bioéthanol et le biodiesel sont les produits majoritaires obtenus par des méthodes physicochimiques ou biochimiques impliquant plusieurs types microbiens, entre autres les levures et les bactéries. Le type de biomasse utilisé a évolué au fil du temps, entraînant la création de différentes générations de biocarburants de la première génération produite à partir de plantes comestibles à la deuxième issue de plantes non comestibles et de déchets agricoles puis la troisième génération extraite d'algues microscopiques et en fin la quatrième génération faisant intervenir les techniques de génie génétique dans la modification des microorganismes producteurs ou celle de la biomasse même. L'utilisation de biocarburants comme source d'énergie présente certes un impact positif sur l'environnement car elle réduit les émissions de gaz à effet de serre, ce qui en a fait le centre d'intérêts et de soutien de nombreux pays pour servir de solution au problème d'approvisionnement énergétique, dans divers secteurs comme les transports et la production d'énergie électrique et thermique, mais ceci ne peut pas nier les inconvénients de cette production particulièrement les investissements nécessaires à leur développement et à leur rentabilité. L'objectif de cette recherche est de jeter la lumière sur le sujet des biocarburants, leur types, leurs caractéristiques, la contribution des bactéries dans leur production et est ce qu'ils constituent réellement une alternative aux énergies fossiles ou pas.

Mots clés : biocarburant, énergie, biomasse, microorganisme, Modification génétique.

Abstract

Biofuels are sustainable energy derived from organic materials of animal or vegetable origin. It is considered renewable energy that results from the conversion of biomass, whether it is in the form of grains and agricultural crops such as corn, or in the form of oils such as soybean oil and palm oil. Bioethanol and biodiesel are the majority of products obtained by physical and biochemical methods that include several microbial species, including yeasts and bacteria. The type of biomass used has evolved over time, creating different generations of biofuels from the first generation produced from edible plants to the second generation from non-edible plants and agricultural residues and then the third generation from algae. Microscopic and finally the fourth generation involving genetic engineering techniques in modifying the production of microorganisms or those of the biomass itself. The use of biofuels as an energy source certainly has a positive impact on the environment because it reduces greenhouse gas emissions, which has made it the focus of interest and support for many countries to serve as a solution to the problem of energy supply, in various sectors such as transport and the production of electrical and thermal energy. However, this cannot deny the drawbacks of this production, particularly the investments necessary for their development and profitability. The aim of this research is to shed light on the subject of biofuels, their types and characteristics, the contribution of bacteria to its production, and whether it really constitutes an alternative to fossil fuels or not.

Key words: biofuel, energy, biomass, Microorganism, Genetic modification.

المخلص

الوقود الحيوي هو طاقة مستدامة مشتقة من مواد عضوية من أصل حيواني أو نباتي. تعتبر طاقة متجددة تنتج عن تحويل الكتلة الحيوية، سواء كانت في شكل حبوب ومحاصيل زراعية مثل الذرة، أو على شكل زيوت مثل زيت فول الصويا وزيت النخيل. الإيثانول الحيوي والديزل الحيوي هما أغلبية المنتجات التي يتم الحصول عليها بالطرق الفيزيائية والكيميائية الحيوية التي تتضمن عدة أنواع ميكروبية، بما في ذلك الخمائر والبكتيريا. لقد تطور نوع الكتلة الحيوية المستخدمة بمرور الوقت، مما أدى إلى إنشاء أجيال مختلفة من الوقود الحيوي من الجيل الأول المنتج من النباتات الصالحة للأكل إلى الجيل الثاني من النباتات غير الصالحة للأكل والمخلفات الزراعية ثم الجيل الثالث من الطحالب المجهرية وأخيراً الجيل الرابع بإشراك تقنيات الهندسة الوراثية في تعديل إنتاج الكائنات الحية الدقيقة أو تلك الخاصة بالكتلة الحيوية نفسها. من المؤكد أن استخدام الوقود الحيوي كمصدر للطاقة له تأثير إيجابي على البيئة لأنه يقلل من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، مما جعله محط اهتمام ودعم العديد من البلدان ليكون بمثابة حل لمشكلة إمدادات الطاقة في مختلف القطاعات مثل النقل وإنتاج الطاقة الكهربائية والحرارية. لكن هذا لا ينفى سلبية هذا الإنتاج، ولا سيما الاستثمارات اللازمة لتنميته وربحيته. الهدف من هذا البحث هو إلقاء الضوء على موضوع الوقود الحيوي: أنواعه، خصائصه ومساهمة البكتيريا في إنتاجه وما إذا كان يشكل بالفعل بديلاً للوقود الأحفوري أم لا.

الكلمات المفتاحية: الوقود الحيوي ، الطاقة ، الكتلة الحيوية ، الكائنات الحية الدقيقة ، التعديل الجيني.

Table des matières

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Abstract

المخلص

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction.....1

Chapitre I : Généralités sur les biocarburants

1. Origine et Définition.....	3
1.1. Notion de biocarburant.....	4
2. Classification des biocarburants.....	5
2.1. Biocarburants de première génér.....	6
2.2. Biocarburants de deuxième génération.....	7
2.3. Biocarburants de troisième génération.....	8
2.4. Biocarburants de quatrième génération.....	9
3. Les voies de production de biocarburants.....	10
3.1 Voie biochimique.....	11
3.2 Voie thermochimique.....	11
3.3 Voie chimique.....	11
4. Différences entre les biocarburants et les carburants fossiles.....	12

Chapitre II : Les biocarburants et les microorganismes impliqués dans leur synthèse

1. La voie biochimique de conversion de la biomasse et intervention des bacteries..	15
1.1 La fermentation.....	16
1.2 Transestérification.....	16
1.3 Digestion anaérobie et production des gaz.....	16
1.4 Biophotolyse de l'eau.....	16
1.5 Les micro-organismes impliqués dans la production.....	17
2. La filière de bioéthanol.....	18
2.1 Fabrication de bioéthanol et de ses dérivés.....	19
2.2 Marché du bioéthanol.....	20
2.3 Les micro-organismes impliqués dans la production des bioéthanol et dérivés.....	
-Zymomonas mobilis.....	21
-Escherichia coli.....	22
-Enterobacter asburiae JDR-1.....	22
-Clostridium acetobutylicum.....	22
-Production de bioéthanol par Pseudomonas putida.....	23
3. La filière Biodiesel.....	23
3.1 Production de biodiesel.....	24
3.2 Marché du biodiesel.....	25
3.3 Production de biodiesel par Saccharomyces cerevisiae.....	25
4. Le biogaz.....	26
4.1 La production de biogaz.....	26
4.2 Bacteries productrices de biogaz.....	27
5. Le Gaz de synthèse ou Syngas.....	27
5.1 Acetobacterium sp et la production de syngas.....	27
6. Le bio hydrogène.....	27
6.1 Production d'H ₂ par Clostridium spp.....	28
6.2 Synthèse d'H ₂ par biophotolyse de l'eau.....	29
7. Piles à combustible microbiennes MFC.....	29
8. Utilisation des biocarburants.....	31

Chapitre III : La production du bioéthanol à partir de biomasse lignocellulosique et l'apport du génie génétique

1. La conversion de la biomasse lignocellulosique.....	33
1.1 Prétraitement de la biomasse.....	34
1.2 L'hydrolyse.....	36
1.3 La fermentation.....	36
2. Les problèmes rencontrés dans ce processus.....	37
3. Solutions qu'apporte le génie génétique.....	37
3.1 Modification génétique de la bactérie.....	37
3.2 Modification génétique de la biomasse.....	39
Conclusion.....	42-43
Références bibliographiques.....	44 -55

Liste des tableaux

Tableau 01	Quelques avantages et inconvénients des biocarburants et des carburants fossiles	Page 13
Tableau 02	Exemples des micro-organismes les plus utilisés dans la production de biocarburants	Page 18
Tableau 03	Les utilisations des biocarburants	Page 31
Tableau 04	Les Avantages et les Inconvénients de sur les différentes méthodes de prétraitement des matériaux lignocellulosiques	Page 35
Tableau 05	Quelques micro-organismes populaires pour la production de bioéthanol	Page 37

Liste des figures

Liste des figures		
Figure 01	Principaux pays producteurs des biocarburants dans le monde	Page 04
Figure02	Efficacité de la production de biocarburants	Page 06
Figure03	Schématisation de production des biocarburants de première génération	Page 06
Figure04	Arbre de pistachier lentille	Page 07
Figure05	Schématisation de la production de biocarburants de deuxième génération par voie biochimique et par voie thermochimique	Page 08
Figure06	Production de biocarburants à partir de micro algues	Page 09
Figure07	sources et production de biocarburants de quatrième génération	Page 10
Figure08	Diverses méthodes pour transformer la biomasse spécifiquement en carburants micro algues	Page12
Figure09	Un aperçu des voies métaboliques microbiennes pour la production de biocarburants	Page15
Figure10	Biocarburants et précurseurs obtenus via la photosynthèse microbienne	Page 17
Figure11	Voie métabolique de production du bioéthanol	Page 19
Figure12	Voie métabolique de la production microbienne de biobutanol	Page 20
Figure13	Voie de biosynthèse de l'isobutanol et enzymes associées pour la production d'isobutanol hétérologue chez <i>Z. mobilis</i>	Page 21
Figure14	Voie hétérofermentaire trouvée naturellement dans <i>E. coli</i>	Page 22
Figure15	Métabolisme des sucres pour produire des biocarburants chez la bactérie <i>Clostridium acetobutylicum</i>	Page 23
Figure16	Schéma de la voie de production de biodiésel	Page

		25
Figure17	Schéma des réactions chimique impliquées dans la production de biohydrogène à partir de la présence d'énergie lumineuse	Page 28
Figure18	Schéma d'une pile à combustible microbienne contenant une cellule bactérienne (BC). Le transport d'électrons fait intervenir des porteurs d'électrons oxydés et réduits (ECred et ECox), et des médiateurs (Medox et Medred)	Page 30
Figure19	Les ressources les plus populaires pour le bioéthanol lignocellulosique	Page 32
Figure20	Structure chimique de la biomasse lignocellulosique	Page 33
Figure21	Schématisation de la production de bioéthanol lignocellulosic	Page 34
Figure22	(A) Produits de fermentation typiques fabriqués par un Escherichia coli K12 fermentant du glucose. Les produits sont exprimés en moles produites pour 100 moles de glucose fermenté avec 91% du carbone représenté comme produits de fermentation. (B) E. coli transformée avec « l'opéron pet » détourne presque tout le glucose en éthanol. Cette souche (KO11) porte également une mutation qui bloque la production de succinate.	Page 39

Introduction

Les ressources naturelles d'origine fossile sont d'une grande importance dans la production de carburants indispensables au fonctionnement de divers secteurs. Depuis leur découverte au 19^{ème} siècle (Eibner, 2015). Leur consommation ne cesse d'augmenter. De nombreuses crises et problèmes sont apparus principalement la forte accumulation de dioxyde de carbone en atmosphère et le danger de pollution de l'environnement, les prix en hausse provoquant le gonflement des factures de production, des crises géopolitiques....etc. En plus, Il s'agit de réserves qui s'épuisent au fil de leur extraction, leur quantité sur terre est limitée, l'Homme devrait donc rechercher des alternatifs ! (Arshad, 2018).

Cela a incité de nombreux pays à adopter et à soutenir la recherche pour trouver une alternative renouvelable et respectueuse de l'environnement (Khiari, 2016).

Des essais sont en cours pour ramener à l'horizon la production de biocarburant à partir de la biomasse en raison de ses avantages comme énergie durable, renouvelable, respectueuse de l'environnement et réduisant indirectement les gaz à effet de serre.

Cette technologie a connu une évolution continue de la première génération dérivée de matières premières utilisées dans l'approvisionnement en alimentation humaine et animale, à la deuxième génération qui est produite de déchets agricoles et industriels constituant ainsi un moyen de recyclage efficace dont le plus important est la biomasse lignocellulosique. La troisième génération est produite à partir de micro-organismes, principalement des microalgues présentant certains avantages est leur Croissance excessive et production de grandes quantités d'acides gras (AL-Haj, 2014). La quatrième génération est un complément à la troisième appelée carburant avancé faisant appel aux techniques du génie génétique.

En raison de la diversité métabolique des différents micro-organismes qui permettent Production de biocarburants à partir de divers substrats. Par exemple, la plupart des bactéries peuvent être facilement transformées sucres en éthanol, et les méthanotrophes utilisent du méthane pour produire du méthanol. De plus, certains Des bactéries telles que *Geobacter sulfurreducens* et *Shewanella oneidensis* , présentent une spécificité moléculaire.Machines qui aident à transférer les électrons de la membrane microbienne externe vers les surfaces conductrices Plus tard, cette fonctionnalité pourra être déployée dans des dispositifs bioélectrochimiques de production de biohydrogène et bioélectricité (Kumar et Kumar.,2017).

L'objectif principal de ce travail est d'exposer les connaissances autour des biocarburants et leurs perspectives de production. Les biocarburants peuvent-ils être une alternative viable aux carburants fossiles ?

Le premier chapitre donne un aperçu de l'origine du biocarburant, de sa première utilisation et des obstacles auxquels sa production a été confrontée, ainsi que des principaux pays qui utilisent et soutiennent sa production. Les différentes générations de biocarburants sont aussi expliquées.

Le deuxième chapitre est consacré au rôle des microorganismes dans la production de biocarburants et la conversion de la biomasse. La lumière est focalisée sur l'action de quelques exemples de bactéries et les voies biochimiques empruntées ainsi que les différents types de biocarburants synthétisés.

Le troisième chapitre est consacré à la production du bioéthanol à partir de biomasse lignocellulosique et à l'utilisation de bactéries modifiées génétiquement afin d'améliorer le rendement. Ça aborde aussi les différents obstacles rencontrés dans la production et comment le génie génétique apporte des solutions.

Chapitre I : Généralités sur les biocarburants

1. Origine et définition

Le biocarburant est considéré comme plus ancien que les combustibles fossiles, car en 1860, *Nicholas Augustus* a utilisé de l'éthanol comme essence de remplacement dans son premier modèle de moteur à allumage commandé et une usine de sucre a été créée pour travailler avec lui en 1900. *Rudolf Diesel* a aussi remplacé le gazole dans son moteur par l'huile végétale (huile d'arachide) et les carburants à base de maïs pendant longtemps. Jusqu'à ce que le pétrole entre sur le marché, où il s'est avéré être un carburant supérieur à l'époque (prix, offre et efficacité) accompagné de l'utilisation des huiles et d'éthanol comme carburants alternatifs à très petite échelle dans les années trente et quarante du XXe siècle (Al-Haj, 2014).

En 1955, le concept d'utiliser des algues pour produire des biocarburants a été proposé, et l'idée a été améliorée en 1960, lorsqu'elle a été cultivée dans le flux d'entrée des étangs ou la biomasse algale est digérée pour produire du méthane. Depuis les crises pétrolières de 1973-1979 et en raison des craintes d'une forte consommation de carburant, les biocarburants conventionnels sont réapparus avec la découverte et l'utilisation réussie de systèmes microbiens impliqués dans la synthèse de certains types de biocarburants (notamment l'éthanol, mais il n'était pas considéré comme un carburant idéal et ne pouvait pas être utilisé en distribution car il est corrosif) tout en cherchant à améliorer leurs propriétés (Al-Haj, 2014).

Au siècle actuel, en raison de l'épuisement du pétrole et de la demande croissante avec les fluctuations des prix, le problème de l'augmentation des gisements de gaz à effet de serre et la pression climatique, plus de 40 pays ont formulé une politique de soutien aux biocarburants. (Archad, 2018). A la tête de liste de ces pays se trouvent les États-Unis d'Amérique, le Brésil, la France, l'Allemagne, la Chine et l'Indonésie (voir figure 01).

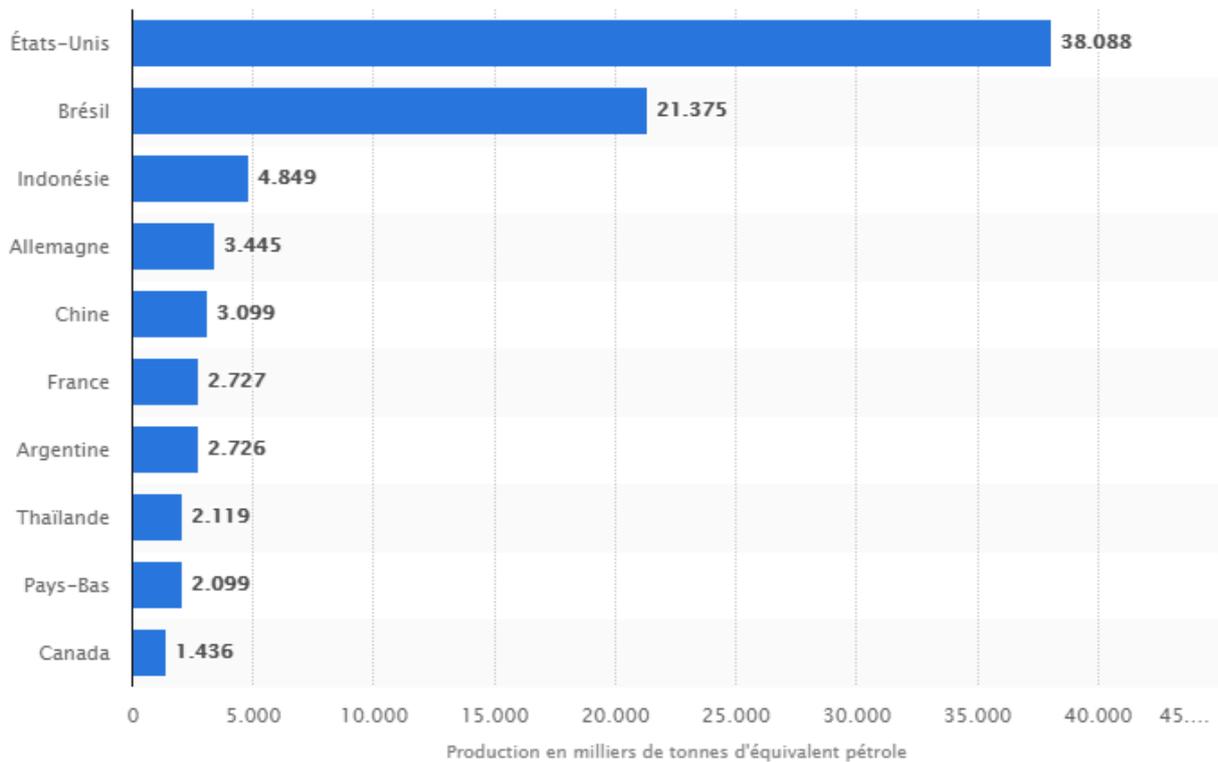


Figure 01 : Principaux pays producteurs des biocarburants dans le monde

(Source : <https://fr.statista.com/statistiques/571268/biocarburants-production-dans-les-principaux-pays-par-equivalent-petrole-en/>)

1.1 Notion de biocarburant

C'est le carburant résultant du processus de stabilisation biologique du carbone, où le carbone inorganique est converti en composés organiques tels que les graisses, les alcools, les protéines et autres qui sont utilisés dans la production d'énergie. Tout hydrocarbure produit à partir de matière organique (vivante ou autrefois vivante) dans un court laps de temps est considéré comme un biocarburant, qu'il soit fabriqué par un organisme vivant ou par réactions chimiques à petite ou à grande échelle (Gerali,2020).

Les biocarburants sont également appelés énergies renouvelables durables faisant partie d'une palette d'énergies (eau, vent, géothermie, bois, biogaz, etc.) déployées ces dernières années pour remplacer les énergies fossiles (charbon, gaz naturel, pétrole) (Drogue,2012).

Ils sont qualifiés de renouvelables et durables dont les réserves ne s'épuisent pas donc leur taux de formation est supérieur au taux d'utilisation (Ricaud et Lokhait, 2012).

Les biocarburants sont produits à partir de matières organiques issues de biomasse biodégradable d'origine animale (graisses et huiles animales) ou industrielle (déchets industriels et huiles de cuisson) (Khiari, 2016). Il peut également s'agir de micro-organismes (levures, bactéries..) ou des microalgues.

Par définition, la biomasse est toute matière organique résultant de la photosynthèse ou bien de la biodégradation des produits et déchets agricoles, animaux et industriels (Alfeno et Molina, 2016). La biomasse végétale constitue une source d'énergie alternative. Elle provient de la forêt, du bois ou des déchets végétaux, ainsi que des cultures destinées à la production de biocarburants, elle est constituée de lignocellulose, un matériau complexe composé principalement de cellulose et d'hémicellulose, auquel la lignine est liée par des liaisons hydrogène, rarement de manière covalente (Andrlova, 2013).

2. Classification des biocarburants

Aujourd'hui, il existe trois filières principales de biocarburants qui sont la production de bioéthanol par fermentation de produits végétaux (blé, maïs, betterave, canne à sucre, etc.) la production de biodiesel à partir d'huiles (dont les principales sont celles de colza, tournesol, soja et palme) et la filière dédiée au biogaz (biométhane) remplaçant le gaz naturel. Les biocarburants produits par ces différentes filières sont dits « de première génération ». Il existe également une deuxième et une troisième génération, voir une quatrième génération. La deuxième génération diffère de la première par l'utilisation de la plante entière (feuilles, pailles et tiges) ou des plantes spécifiquement dédiées à la production de biocarburants, ainsi que des déchets agricoles. Ceux de la troisième génération sont produits à partir d'algues (appelés alors algocarburant), tandis que la quatrième génération de biocarburants est synthétisée à partir de biomasse génétiquement modifiée faisant aussi intervenir des microorganismes génétiquement modifiés. L'évolution vers de nouvelles générations est principalement due au fait que les biocarburants de première génération utilisent des cultures destinées à l'alimentation humaine ou animale (Drogué, 2012). Les quatre générations de biocarburants diffèrent donc par le type de biomasse utilisée (voir figure 02).

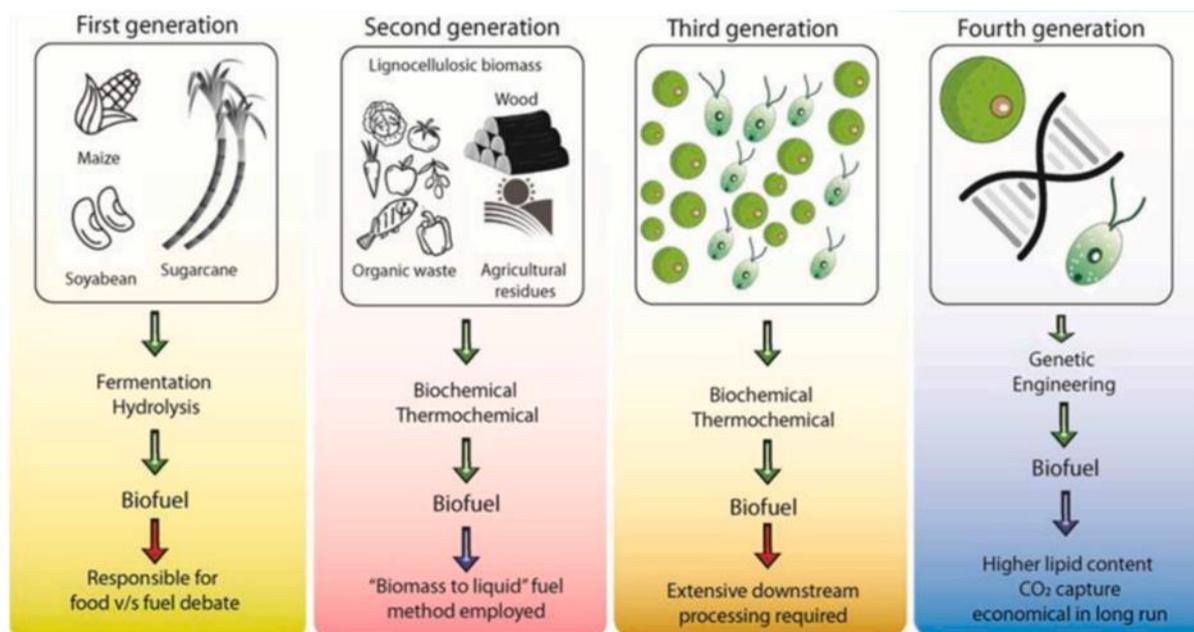


Figure 02 : Efficacité de la production de biocarburants (Malode *et al.*,2021).

2.1 Biocarburants de première génération

La biomasse dérivée de plantes telles que le maïs, la canne à sucre, le colza et le soja est utilisée dans la production des biocarburants de première génération (Al-Haj, 2014), tels que l'éthanol, le biodiesel et le méthane (voir figure 03).

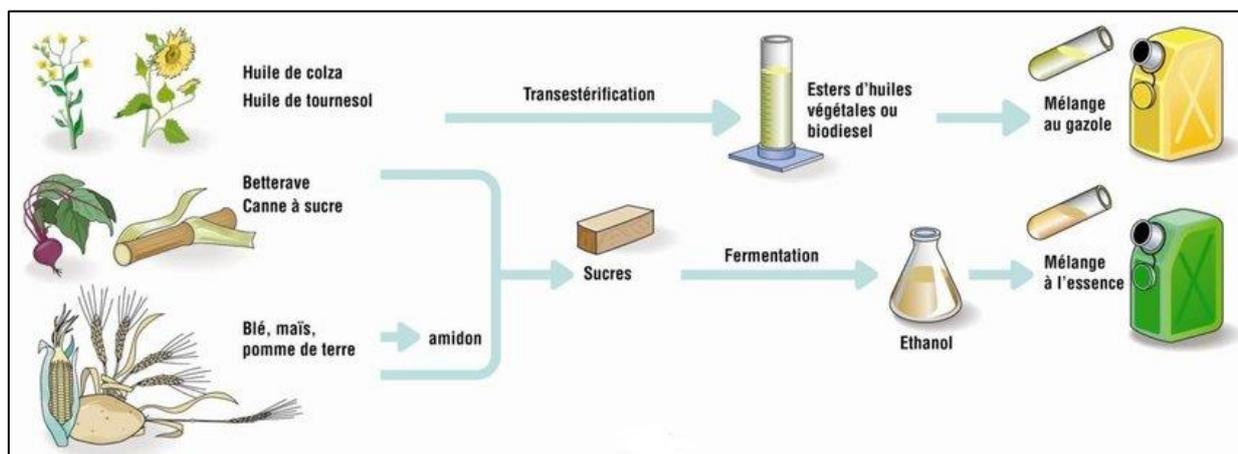


Figure 03 : Schématisation de production des biocarburants de première génération.

(Source : IFP énergies nouvelles : <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energiesrenouvelables/quel-avenir-les-biocarburants>)

Cependant, la dépendance de la production de ce carburant vis-à-vis des matières premières entrant dans la chaîne alimentaire, humaine et animale a entraîné une pénurie sur le marché et une hausse de leurs prix entre 2002 et 2008. Cette dépendance était à l'origine de l'explosion du marché alimentaire (à 75%) à cette époque et il fallait donc chercher des alternatives non alimentaires abondantes, par exemple, le pistachier lentille (arbre oléagineux) (voir figure 04). Cet arbre pousse à l'état sauvage dans le bassin méditerranéen (disponible en lot en Afrique du Nord) et contient des taux élevés d'huiles (Khiari , 2016).



Figure 04 : Arbre de pistachier lentille (Khiari , 2016).

2.3 Biocarburants de deuxième génération

Pour cette catégorie de carburant, la biomasse est dérivée de déchets agricoles tels que la paille de blé et de riz, les copeaux de bois, les tiges et les feuilles de maïs et de canne à sucre qui sont utilisés dans sa production (Al-Haj, 2014). Le problème de cette génération est la formule complexe lignocellulosique, qui nécessite un budget de transformation, mais elle surpasse la première génération par rapport à l'utilisation de déchets non alimentaires et à la non exigence de leur cultures en eau et en terre arable. Ses produits sont : le bioéthanol, le biodiesel, le biogaz de deuxième génération qui n'ont pas encore fait l'objet d'une promotion sur le marché industriel, mais les perspectives de leur fabrication à moyen terme commencent à se dessiner, une production à grande échelle étant prévue pour 2020-2030 (Khiari, 2016) (voir figure 05).

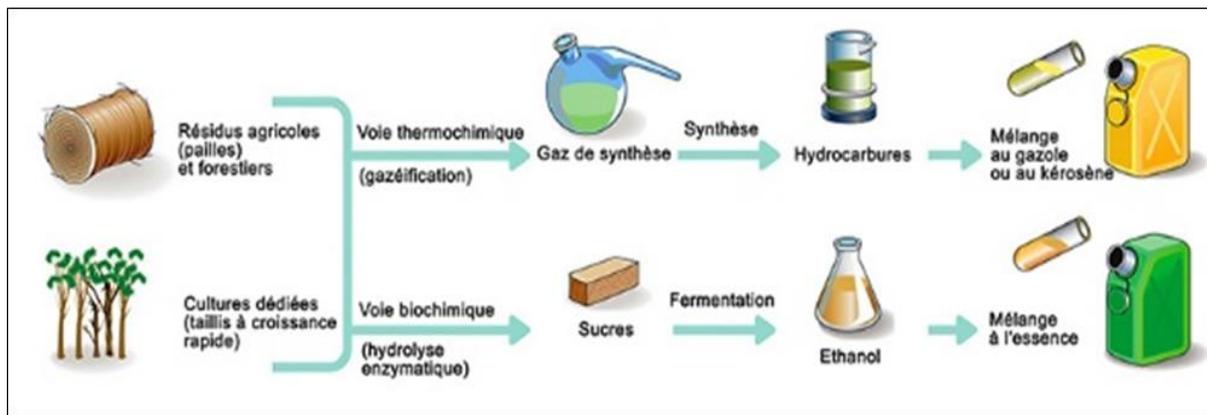


Figure 05 : Schématisation de la production de biocarburants de deuxième génération par voie biochimique et par voie thermochimique.

(Source : Ministère de la Transition écologique et solidaire, <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biocarburants>).

2.4 Biocarburants de troisième génération

Afin de les produire, des microalgues surtout mais aussi des espèces microbiennes (levures, champignons et bactéries) sont utilisées comme biomasse. Plusieurs expériences ont montré de bons résultats dans la production de biodiesel. Ces organismes peuvent fabriquer et stocker des quantités importantes d'acides gras (semblables à ceux que l'on trouve dans les huiles végétales). Cette génération de carburants offre de nombreux avantages compétitifs pour la première et la deuxième génération, par exemple, la vitesse de reproduction et de croissance de ces organismes. (Chisti, 2007). La masse restante après l'extraction des huiles peut être convertie en biogaz par le processus de fermentation anaérobie. Par conséquent, le biodiesel produit à partir de microalgues est considéré comme une grande découverte dans la production de biocarburants. Cependant, le problème du coût est toujours présent puisqu'il y'a une forte consommation d'énergie lors des nombreuses étapes de production notamment la cassure des parois cellulaires d'algues qui constitue une étape difficile (Al-Haj, 2014) (voir figure06).

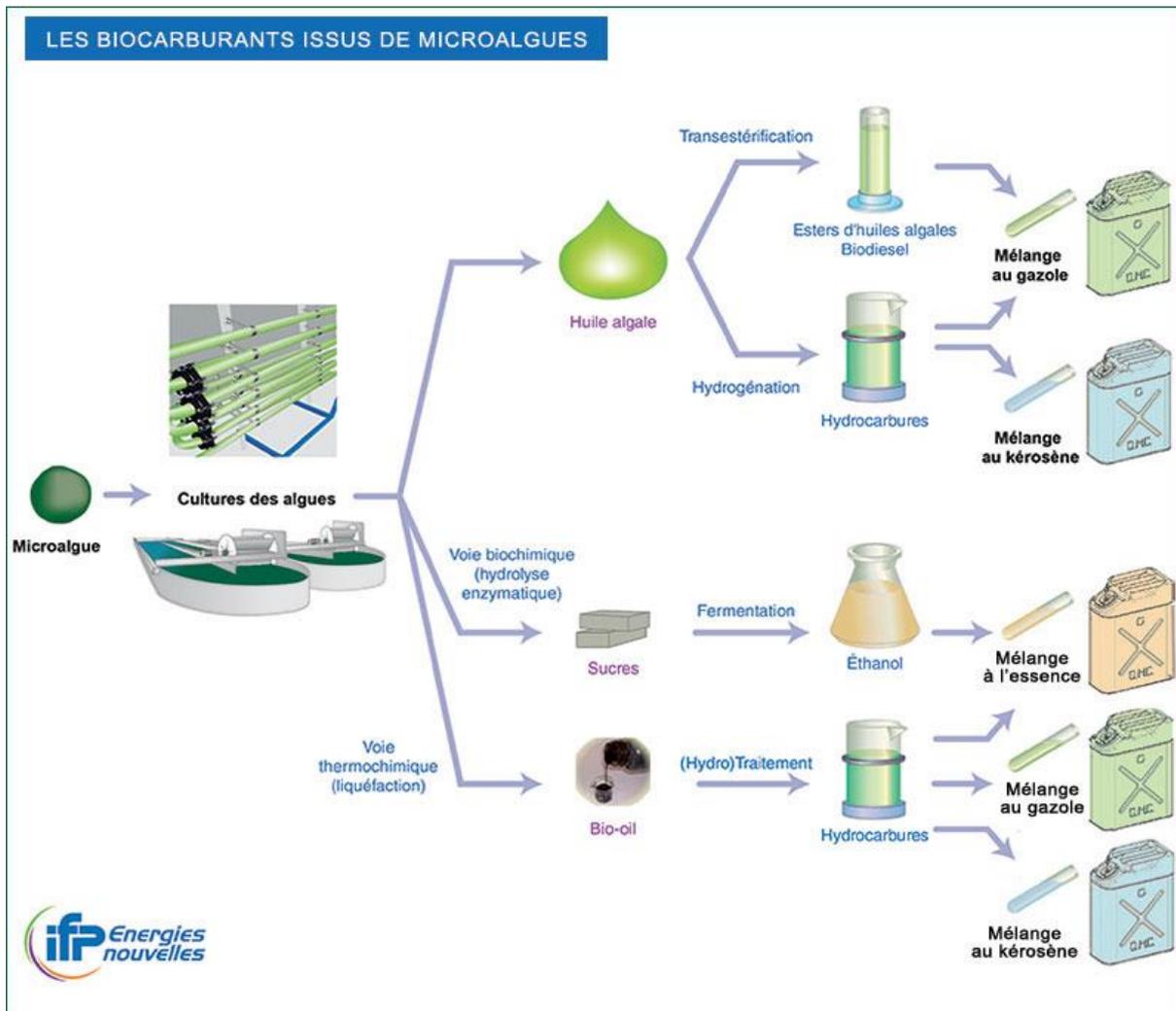


Figure 06 : Production de biocarburants à partir de microalgues.

(Source : IFP énergies nouvelles : <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energiesrenouvelables/quel-avenir-les-biocarburants>)

2.4 Biocarburants de quatrième génération

Ils sont également appelés biocarburants avancés, pour lesquels des techniques avancées de biologie synthétique et des techniques de modification génétique sont utilisées afin de transformer des micro-organismes en une usine de biocarburants en un nombre réduits d'étapes de transformation diminuant ainsi le coût de production (voir figure 07). Cependant, il ne s'agit toujours que d'une idée au stade des tests et expérimentation (Al-Haj, 2014).

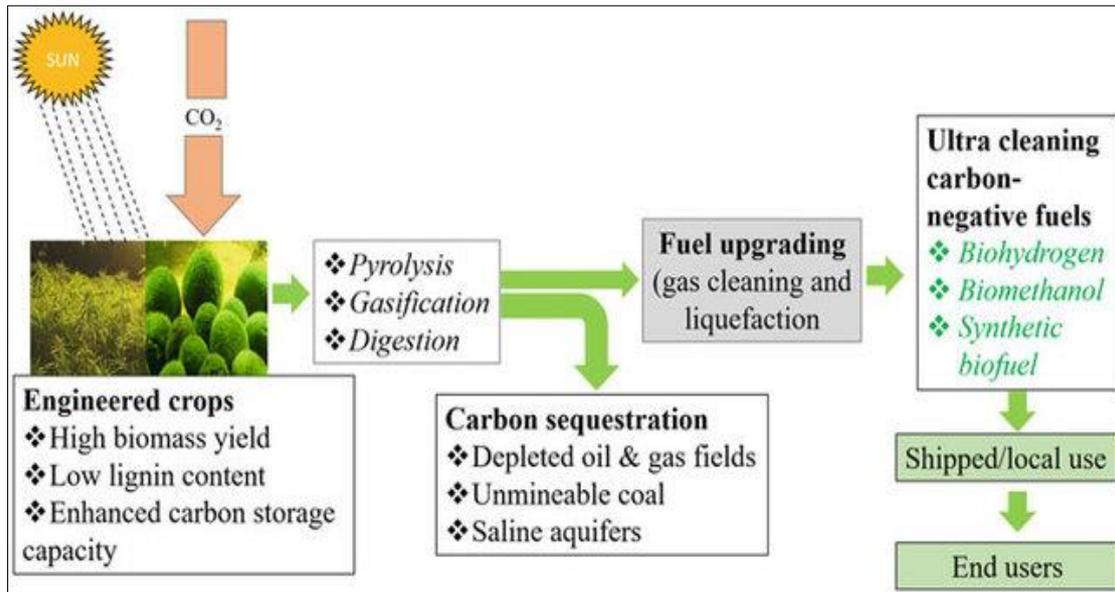


Figure 07 : Sources et production de biocarburants de quatrième génération (Singh *et al.*,2020)

3. Les voies de production de biocarburants

La production de biocarburants nécessite un effort continu pour améliorer efficacement les propriétés physiques, chimiques, dynamiques et thermiques de la source. Plusieurs facteurs doivent être pris en compte lors de la conception de tout type de biocarburant afin d'aboutir à des biocarburants de qualité, compatibles avec les infrastructures de distribution et de stockage; à savoir : contenu énergétique, qualité, combustion, volatilité, congélation, points d'ébullition, odeur et toxicité (Al-Haj, 2014).

La transformation de la biomasse en biocarburant repose sur trois méthodes principales (Kapogbemabou, 2011) :

- Voie biochimique
- Voie thermochimique
- Voie chimique

3.1 Voie biochimique

Elle assure la conversion des sucres et des graisses (grains oléagineux, microalgues). L'hydrolyse est un procédé enzymatique (beaucoup mieux en termes de rendement que la chimique), où un groupe d'enzymes spécialisées travaille à rompre les chaînes polymères et à transformer la cellulose et l'hémicellulose en une substance fermentescible (sucres glucose et saccharose....) (Biomasse végétale) (Kapogbemabou, 2011).

Ces sucres sont métabolisés en biocarburants liquides (éthanol et ses dérivés) par des processus de fermentation de micro-organismes (Koita, 2012) ou de digestion anaérobie pour produire du biométhane, qui est converti par action méthanotrophe en biométhanol.

Certains microorganismes ont également montré leur capacité à transférer des électrons de la membrane externe des cellules vers des surfaces conductrices et à générer de l'électricité et du biohydrogène (Kumar et Kumar, 2017).

3.2 Voie thermochimique

Cette voie utilise la thermochimie pour séparer la biomasse et produire principalement du gaz de synthèse (syngas) ou du peroxyde de biohuile par techniques de pyrolyse 200°C ou par acide dilué par liquéfaction hydrothermale ou par gazéification. (Kapogbemabou, 2011).

3.3 Voie chimique

C'est la transestérification permettent la production directe de biodiesel en un mélange à froid d'un alcool avec une huile végétale, les graisses animales ou les huiles à base de microalgues en présence d'un catalyseur (hydroxyde de sodium ou de potassium). Afin d'augmenter le taux de conversion des biocarburants, un traitement biologique peut être effectué par modification génétique de la matière organique et les microorganismes produits (Kapogembou,2011). Au niveau industriel, le bioéthanol et le biodiesel sont les plus répandus, et les autres types sont encore à l'étude et à l'expérimentation. Voir figure 08 qui résume les différentes méthodes de transformation.

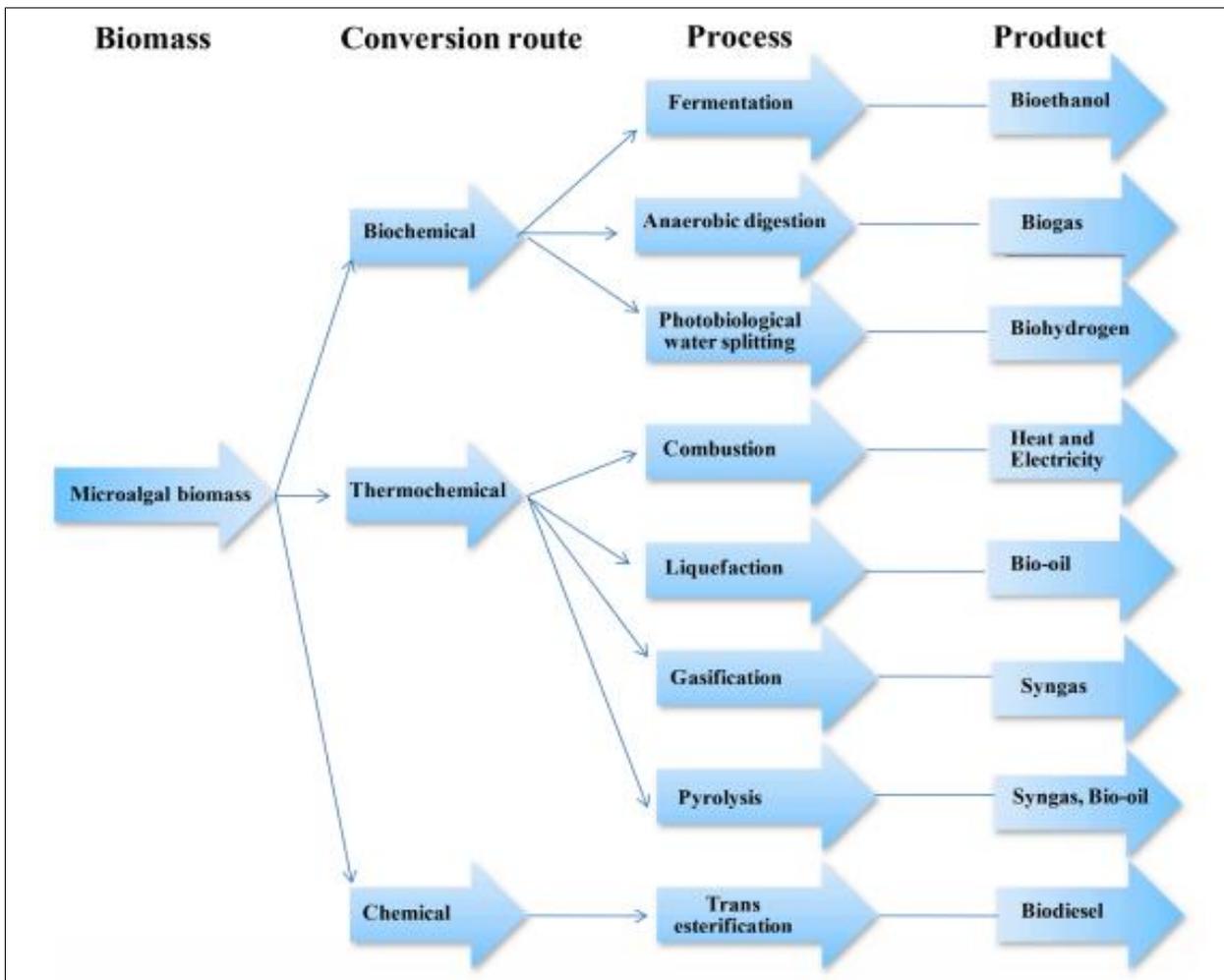


Figure 08: Diverses méthodes pour transformer la biomasse spécifiquement en carburants microalgues (Malode *et al.*, 2021).

4. Différences entre les biocarburants et les carburants fossiles

En raison de la demande mondiale croissante d'énergie et de carburants au cours des dernières décennies, les biocarburants sont considérés comme une alternative prometteuse aux carburants fossiles dans le secteur des transports (Heger *et al.*, 2016).

Les biocarburants couvrent l'ensemble des carburants liquides, solides ou gazeux produits à partir de la biomasse et destinés à une valorisation énergétique dans les transports. Deux grands types de biocarburants sont produits industriellement : l'ETBE (Ethyl-Tertio-Butyl-Ether) issu de l'éthanol de blé ou de betterave et l'EMHV (Ester méthylique d'huile végétale ou ester de colza) issu de l'huile de colza (Sourie *et al.*, 2005).

Le tableau 01 résume certains avantages et inconvénients des biocarburants et des carburants fossiles :

Tableau 01 : Quelques avantages et inconvénients des biocarburants et des carburants fossiles.

Biocarburants	Carburants fossile
ressources durables et renouvelables (Feng, 2009)	Ressource limitée insoutenable Épuisement de l'approvisionnement (Ricaud et Lokhat, 2012)
L'utilisation des biocarburants permet la réduction des factures pétrolières ainsi que la diversification et la décentralisation des approvisionnements énergétiques (Dorin et Gitz, 2008)	l'utilisation des carburants fossiles dans divers secteurs et particulièrement le transport et l'augmentation du nombre de véhicules à provoquer l'apparition de pénuries des carburants dû à l'épuisement des réserves(Égalité, 2007).
L'utilisation des biocarburants peut contribuer au maintien et à l'amélioration des revenus et emplois agricoles, par contre elle peut avoir un effet négatif sur le prix mondial du produit agricole et sur la sécurité alimentaire (notamment ceux de la première génération) (Koizumi, 2015). (Dorin et Gitz, 2008).	les carburants fossiles participent à la pollution de l'eau utilisée pour l'irrigation en agriculture (Cellier et Genermont, 2016).

<p>L'utilisation des biocarburants pour la production d'énergie peut avoir un effet moins négatif sur l'environnement. Elle permet la réduction de l'émission des gaz à effet de serre, ainsi que la réduction de l'émission du CO, HC, SO₂, (ce n'est pas le cas pour ceux de la première génération (Dorin et Gitz, 2008). (Cortez et Leite, 2012). (Stolarski <i>et al.</i>, 2019).</p>	<p>les combustibles fossiles ont plusieurs effets négatifs sur l'environnement, le plus important est l'augmentation de l'effet de serre (Bobin <i>et al.</i>, 2021).</p>
<p>Son utilisation est encore limitée (Al-Haj, 2014)</p>	<p>Donne 80% de la consommation d'énergie (Khiari , 2016)</p>
<p>Augmente le développement économique rural La bonne utilisation de ses cultures (cultures non alimentaires) est une nouvelle source de revenus pour les agriculteurs (Ricaud et Lokhat, 2012)</p>	<p>L'augmentation de ses prix et l'inflation de sa facture de production due à la demande croissante de ses produits (dans de nombreux secteurs) (Ubaidialah <i>et al.</i>, 2021).</p>
<p>Il est encore à l'étude et à la modification (Hébert, 2013)</p>	<p>La source d'énergie la plus importante aujourd'hui (Feng, 2009)</p>
<p>La plupart de ses sources sont des déchets organiques (Al-Haj, 2014).</p>	<p>source fossile</p>

Chapitre II : Les biocarburants et les microorganismes impliqués dans leur synthèse

1. La voie biochimique de conversion de la biomasse et intervention des bactéries

L'incroyable diversité métabolique du monde microbien peut aider à faire face à deux défis majeurs : fournir un approvisionnement énergétique mondial durable et minimiser le changement climatique (Tiedje et Donohue, 2008). Les principaux éléments constituant la biomasse sont le carbone, l'hydrogène, l'oxygène et l'azote (francois-lopez, 2016). Plusieurs processus de conversion de celle-ci font appel à l'action des enzymes bactériennes qui constituent des moyens efficaces et durables produisant des combustibles liquides, de l'hydrogène, du méthane, de l'électricité et des matières premières chimiques actuellement dérivées de combustibles fossiles (Tiedje et Donohue, 2008) (voir figure 9).

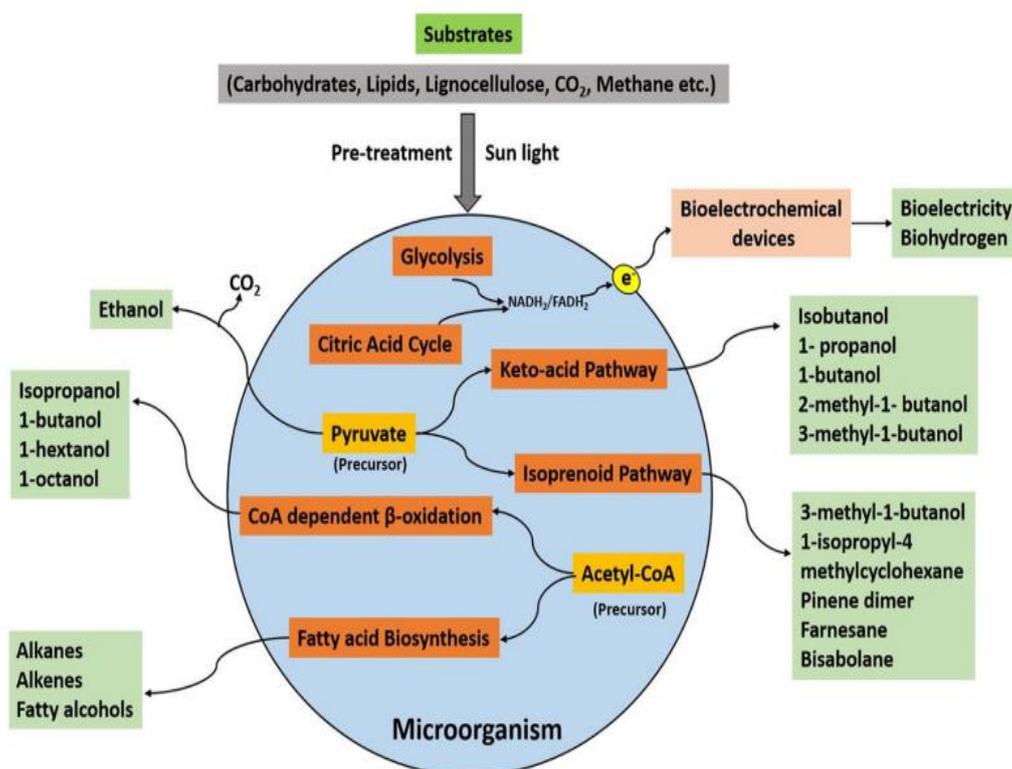


Figure 09 : Un aperçu des voies métaboliques microbiennes pour la production de biocarburants (Kumar et kumar, 2017)

1.1. La fermentation

Le terme fermentation vient d'un mot latin « Fermentum » qui veut dire fermenter, et selon d'autres auteurs il vient du mot latin « Fermentare » qui signifie « faire lever » ou aussi du mot latin « Fervere » qui signifie « bouillir ». C'est un processus dans lequel les changements chimiques dans un substrat organique résultent de l'action d'enzymes microbiennes. D'une façon générale, la fermentation est un processus biochimique qui convertit les sucres en acides, en gaz ou en alcool (Nancib, Chojnacka, 2010, Martínez-Espinosa, 2020).

La biomasse lignocellulosique contient des glucides complexes qui nécessitent l'utilisation de microorganismes capables de fermenter les sucres non fermentescibles par la levure de bière (la xylose est le plus important entre eux). Plusieurs micro-organismes sont capables de faire une fermentation de bioéthanol comme par exemple *Pseudomonas putida*.

1.2. Transestérification

Les microorganismes jouent différents rôles dans la synthèse de biodiesel ; ils peuvent fournir soit des lipides, c'est notamment l'exemple de certaines espèces du genre bactérien *Rhodococcus* sp. (Hwangbo et Chu, 2020) soit du méthanol ou du bioéthanol par voie fermentaire, remplaçant l'éthanol pétrochimique nécessaire à la réaction d'estérification (utilisation de *Zymomonas mobilis* ou d'*Escherichia coli* modifiée génétiquement (Koppolu et Vasigala, 2016). Ils peuvent aussi assurer la biocatalyse grâce à leur lipase ou estérases (exemple de *Bacillus aerius*) (Narwal *et al.*, 2015).

La transformation des huiles en biodiesel se fait par différentes méthodes, la plus prometteuse est la transestérification. L'utilisation de la lipase microbienne comme biocatalyseur dans la production de biodiesel à la place des catalyseurs chimiques a été largement étudiée. L'avantage prépondérant est leur potentiel à utiliser tous les types de glycérides ainsi que les acides gras libres de différentes sources d'huile pour la production de biodiesel (Sharma *et al.*, 2019).

1.3. Digestion anaérobie et production des gaz

La digestion anaérobie est un procédé qui permet la dégradation des résidus liés à l'activité humaine (déchets urbains, agricoles et d'élevage) pour produire un biogaz (composé principalement de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂), contenant ainsi un fort potentiel énergétique (Motte, 2013). Parmi les micro-organismes impliqués dans la digestion

anaérobie et la production des gaz il y a *Acetobacterium* sp (*Acetogens*) (Zakaria et Dhar, 2021).

1.4. Biophotolyse de l'eau

La biophotolyse de l'eau est une technique qui permet la capture et l'utilisation de l'énergie solaire (Skulberg, 1995) pour réaliser la photolyse biologique de l'eau (voir figure 10) et aussi pour convertir de la matière minérale de faible énergie en composés organiques de haute énergie (Megret *et al.*, 2015) ; (Franck, 2012). Il existe la biophotolyse directe et la biophotolyse indirecte. Les cyanobactéries sont les bactéries capables de réaliser une photolyse de l'eau parmi elles on peut citer l'exemple de *Aphanizomenon flos-aquae* (Lavoie *et al.*, 2007).

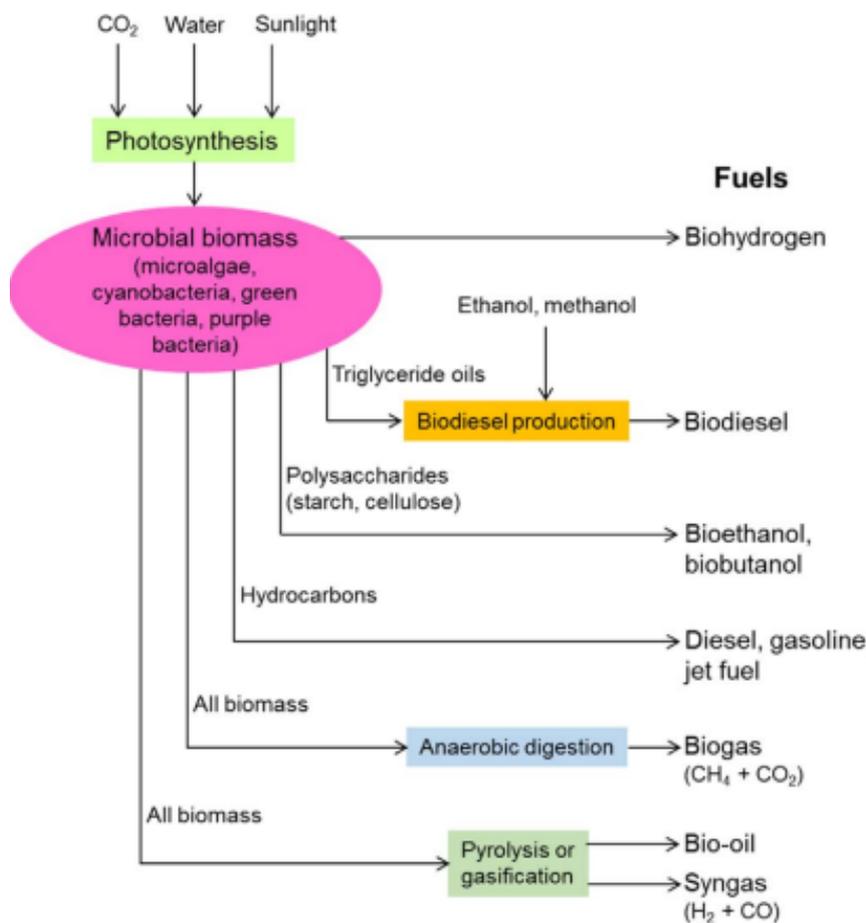


Figure 10 : Biocarburants et précurseurs obtenus via la photosynthèse microbienne (Majidian *et al.*, 2017).

1.5. Les micro-organismes impliqués dans la production

Les microorganismes capables de réaliser une fermentation alcoolique à partir d'hydrolysats de matière lignocellulosique sont nombreux et regroupent des bactéries, des levures et des mycètes filamenteux (Corcos, 2013). Le tableau 02 représente les principaux microorganismes impliqués dans la production de biocarburants.

Tableau 02 : Exemples des micro-organismes les plus utilisés dans la production de biocarburants

Les microorganismes	Le biocarburant	La référence
<ul style="list-style-type: none"> • <i>S. cerevisia</i> • <i>Zymomonas mobilis</i> • <i>Zymobacter palmae</i> • <i>E. coli</i> • <i>Clostridium</i> sp 	Fermentation de bioéthanol	(Phukan <i>et al.</i> , 2019) (Yang <i>et al.</i> , 2018) (David , 2015) (Reeder <i>et al.</i> , 2019)
<ul style="list-style-type: none"> • <i>S. cerevisia</i> • <i>E. coli</i> • <i>Pseudomonace cepacia</i> • <i>Candida antractica (leur enzyme)</i> 	Biodiesel	(Phukan <i>et al.</i> , 2019) (David, 2015)
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Acetobacterium</i> sp(<i>acetogens</i>) • <i>Methanocens</i> 	Biogaz	(Manimegalai <i>et al.</i> , 2014)
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Geobacter suffurreducens</i> • <i>Shewanella ondeidensis et S. putrefecins</i> • <i>Comamonas</i> spp • <i>Clostridium</i> spp • <i>Chlamydomonas reihardtii</i> 	H ₂ et FMC	(Sparling <i>et al.</i> , 2006)
<ul style="list-style-type: none"> • Cyanobactéries 	Biophotolyse de l'eau	(Menia <i>et al.</i> , 2019)

2. La filière Bioéthanol

Le CH_3OH est l'éthanol produit par la fermentation de la biomasse (fermentation des sucres) créée à partir de matières riches en saccharose (canne à sucre) amidon (maïs, blé, etc.) substrats de cellulose (déchets agricoles) cultures énergétiques, Microalgues. Le bioéthanol contient 35% d'oxygène qui permet la réduction des émissions de particules pour réduire les émissions de CO_2 de 7% (Sadi, 2012).

2.1. Fabrication de bioéthanol et de ses dérivés

Les microorganismes les plus utilisés dans le processus de fermentation et la production d'éthanol sont *Saccharomyces cerevisiae* (levure) et *Zymomonas mobilis* (bactérie) souvent utilisée pour convertir l'amidon en glucose puis en bioéthanol (voir figure 11). *E. coli* et le genre *Clostridium* sont destinées à l'usage industriel en raison de leur capacité à métaboliser les pentoses (arabinose, xylose) et afin d'augmenter la productivité énergétique, des travaux de modification génétique sont entretenues pour améliorer l'efficacité productive de ces organismes (Koita, 2012).

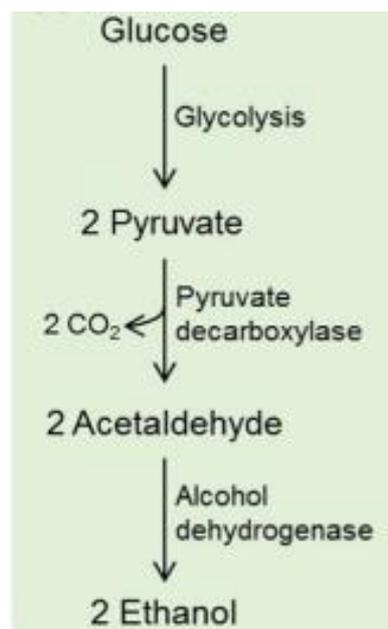


Figure 11: Voie métabolique de production du bioéthanol (Majidian *et al.*, 2017)

Le biobutanol dérive de l'éthanol (voir figure 12) et présente de meilleurs avantages (teneur énergétique plus élevée, corrosion et humidité plus faibles), mais il est produit en moindre quantité (Koita, 2012).

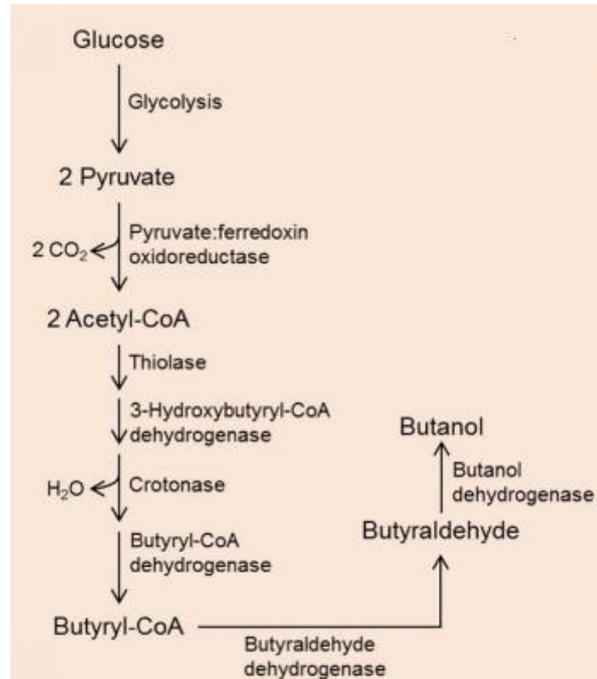


Figure12 : Voie métabolique de la production microbienne de biobutanol

(Majidian *et al.*, 2017)

2.2. Marché du bioéthanol

La production annuelle de bioéthanol dans le monde est de 100 milliards de litres, ce qui est le plus grand volume de production de tout biocarburant produit à partir de microbes. Les leaders mondiaux de la production de bioéthanol sont les États-Unis d'Amérique (50 milliards de litres de maïs) et le Brésil (30 milliards de litres de canne à sucre) (Walker, 2010).

Le bioéthanol est reconnu comme une alternative car il peut être obtenu de manière durable sous tous les climats. Les États-Unis d'Amérique ont également adopté un objectif de produire 36 milliards de gallons de biocarburant en 2022, dont 16 milliards de carburant cellulosique, et en 2009, elle a produit environ 80 milliards de litres de carburant, principalement du bioéthanol issu de cultures (maïs) (Al-Haj, 2014). En 2019 sa production a atteint les 60 milliards de litres de bioéthanol (IFP, <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/>)

Quant à la Chine, elle s'appuie sur les plantes-racines (manioc et patates douces) comme source peu coûteuse de fermentation. Le manioc contient un pourcentage élevé de teneur en saccharose d'origine 30%. Le manioc séché (80% substrats fermentescibles) pousse

dans les zones tropicales et subtropicales, c'est la culture la plus idéale pour la fermentation du bioéthanol en Chine.

Selon le onzième quinquennal des énergies renouvelables et du développement en Chine, la production de bioéthanol à partir de matières premières non alimentaires ira dans le sens du développement à l'avenir (Feng, 2009). Les perspectives de mise en œuvre de la deuxième et de la troisième génération se dessinent dans de nombreux pays, et le plan de production à grande échelle est prévu pour 2020-2030 (Abdrezzaak ,2017).

2.3. Les micro-organismes impliqués dans la production des bioéthanol et dérivés

Zymomonas mobilis

Zymomonas mobilis est un micro-organisme capable de produire efficacement de l'éthanol à partir des sucres simples en utilisant certaines voies métaboliques (Dunn, 2015 ;Yang *et al.*, 2018). Ainsi, certains auteurs annoncent que ce micro-organisme possède une voie métabolique spéciale Entner-Doudoroff qui peut être utilisée pour la production commerciale de bioproduits (He *et al.*, 2014) et qui produit une seule molécule d'ATP par glucose (Corcos, 2013). De plus, l'intégration du gène hétérologue codant pour la 2-Kéto-isovalérate décarboxylase (KdcA) est requis pour la production d'isobutanol chez *Z. mobilis* et que la production d'isobutanol est passée de presque zéro à 100-150 mg/L chez ces souches modifiées génétiquement avec le gène KdcA (Qui *et al.*, 2020)(voir figure 13).

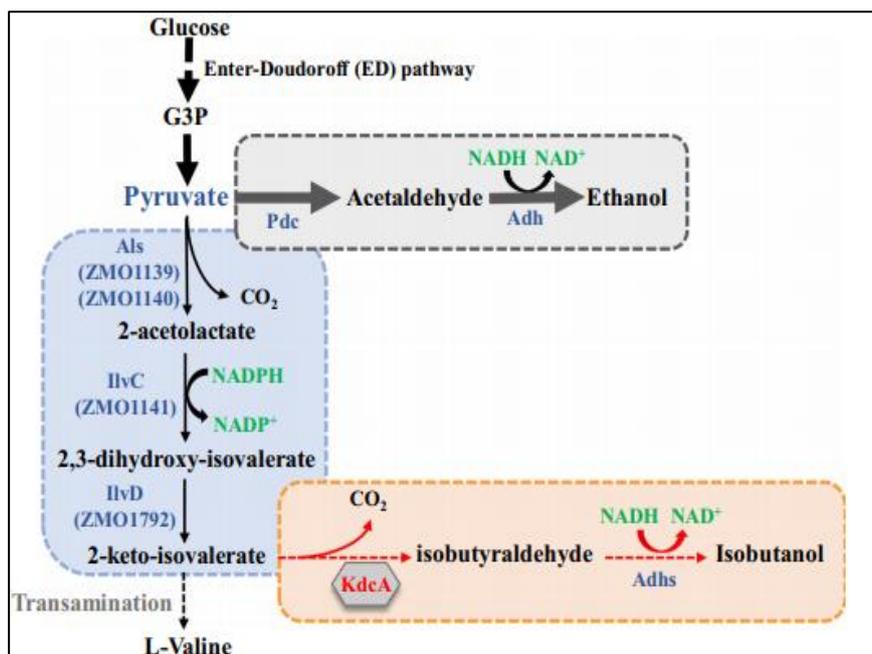


Figure 13 : Voie de biosynthèse de l'isobutanol et enzymes associées pour la production d'isobutanol hétérologue chez *Z. mobilis* (Qui *et al.*, 2020).

Escherichia coli

Les procédés qui sont en développement impliquent l'intervention de la bactérie *Escherichia coli* dans la production de biocarburants (David, 2015). ils se basent sur une modification génétique de la bactérie (*E. coli*), certains chercheurs ont développé une souche *d'E. Coli*, A2A, qui est capable d'utiliser l'hémicellulose ou le glucose générant des acides gras pouvant être utilisés pour produire du biodiesel (Koppolu et Vasigala, 2016). D'autres chercheurs ont émis l'hypothèse de modifier la bactérie en lui insérant des gènes pour qu'elle puisse casser la grosse molécule d'alginate et la transformer en éthanol (David, 2015). Ainsi, selon d'autres auteurs, les souches *d'E. Coli* peuvent être modifiées pour fermenter efficacement les sucres en isopropanol à l'aide de gènes de *Clostridium* et produire aussi l'éthanol et le butanol (Liu et Khosla, 2010). représente la voie de la fermentation du glucose trouvée dans la bactérie *E. coli* produisant de l'éthanol (voir figure14).

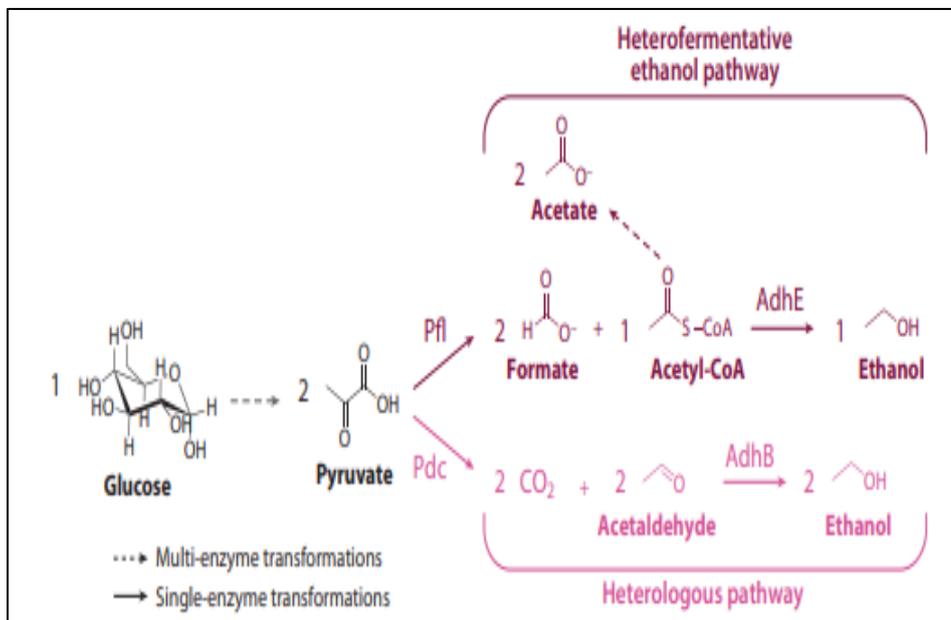


Figure14 : Voie hétérofermentaire trouvée naturellement dans *E. coli* (Liu et Khosla, 2010).

***Enterobacter asburiae* JDR-1**

Les travaux parlant de l'implication de cette bactérie dans la production des biocarburants ne sont pas très abondants, mais la souche JDR-1 de la bactérie *Enterobacter*

asburiae est une autre bactérie qui peut être utilisée pour développer des biocatalyseurs efficaces pour produire des carburants à partir d'hydrolysats d'hémicellulose de bois dur et des résidus agricoles (Bi *et al.*, 2009).

Clostridium acetobutylicum

Clostridium acetobutylicum est une bactérie qui produit naturellement des biocarburants comme le butanol à partir des sources organiques (Reeder *et al.*, 2019) (voir figure 15). Cependant, certains chercheurs ont procédé à une modification génétique de *Clostridium acetobutylicum* par suppression et introduction de certains gènes pour aboutir à une souche capable de produire du n-butanol qui peut être utilisé comme produit chimique en vrac et comme carburant de transport alternatif renouvelable (Nguyen ,2016).

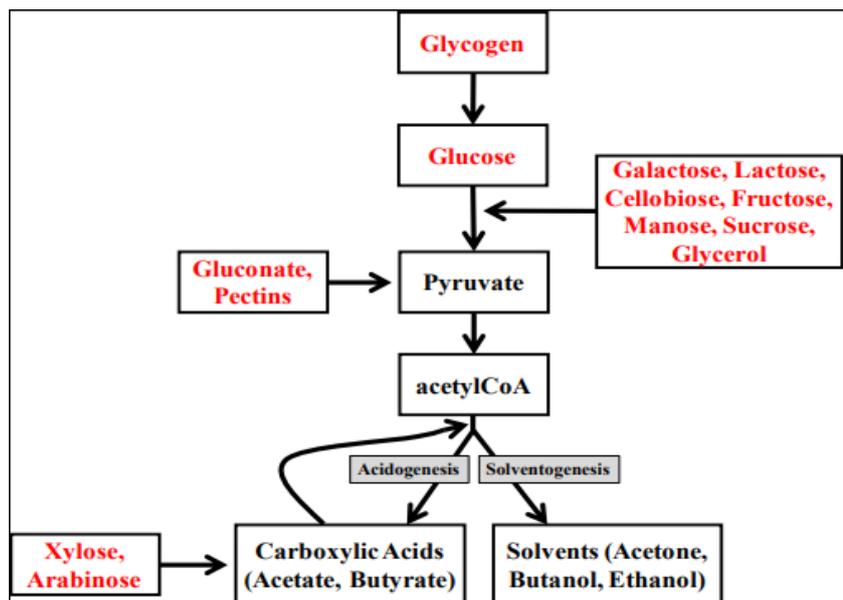


Figure 15 : Métabolisme des sucres pour produire des biocarburants chez la bactérie *Clostridium acetobutylicum* (Reeder *et al.*, 2019) ;

Pseudomonas putida

P. putida est une bactérie à gram négative en forme de bâtonnets qui peut être retrouvée dans divers habitats écologiques grâce à son métabolisme polyvalent adapté pour résister aux

stress physicochimiques (Weimer *et al.*, 2020). C'est un hôte potentiel pour la production de solvants (Cuenca *et al.*, 2016) et certains chercheurs ont procédé à sa modification génétique par l'insertion de certains gènes permettant de l'adapter à ce rôle (Cuenca *et al.*, 2016).

Chez *P. putida* l'éthanol est oxydé en acétaldéhyde par deux voies: l'oxydation périplasmique de l'éthanol et l'oxydation cytosolique de divers alcools (Yang *et al.*, 2019).

3. La filière Biodiesel

C'est un ester mono-alkylique d'acides gras à longue chaîne de formule chimique $C_{20}H_{40}O_2$, produit par la réaction d'estérification des huiles d'origine végétale (colza, soja, jatropha, caranga, jojoba, neem...), de graisses animales, de micro-organismes (micro-algues, champignons, levures), d'huiles de cuisson et de déchets alimentaires. Le biodiesel ne contient presque pas de soufre ou de substances aromatiques. 10% oxygène et acides gras ester éthylique ou méthylique (Buhroo, 2018).

3.1. Production de biodiesel

Le biodiesel produit à partir de microalgues est le plus durable à cause de leur potentiel de croissance rapide. Elles contiennent des niveaux très élevés de graisses (principalement des triglycérides). Les principales étapes de leur extraction sont les suivantes

- Récolte des algues
- Extraction et purification de la biomasse des algues (séchage de la biomasse de plusieurs manières)
- Inactivation des cellules d'algues (stérilisation par hydrolyse acide-alkaline)
- Utilisation de solvants, des ondes ultrasonores ou des impulsion électromagnétique pour extraire les graisses (température effective, par exemple, 60 C°). La concentration de triglycérides est élevée.
- Le dioxyde de carbone est pompé pendant le processus d'extraction pour réduire le pH et faciliter la séparation des huiles (Lin, 2013).

Le biodiesel est fabriqué par un procédé réactif appelé transestérification (Voir Figure 16) mélangeant de l'huile froide à de l'alcool (éthanol) en présence d'un catalyseur chimique (sodium ou l'hydroxyde de potassium) (Arshad, 2018)

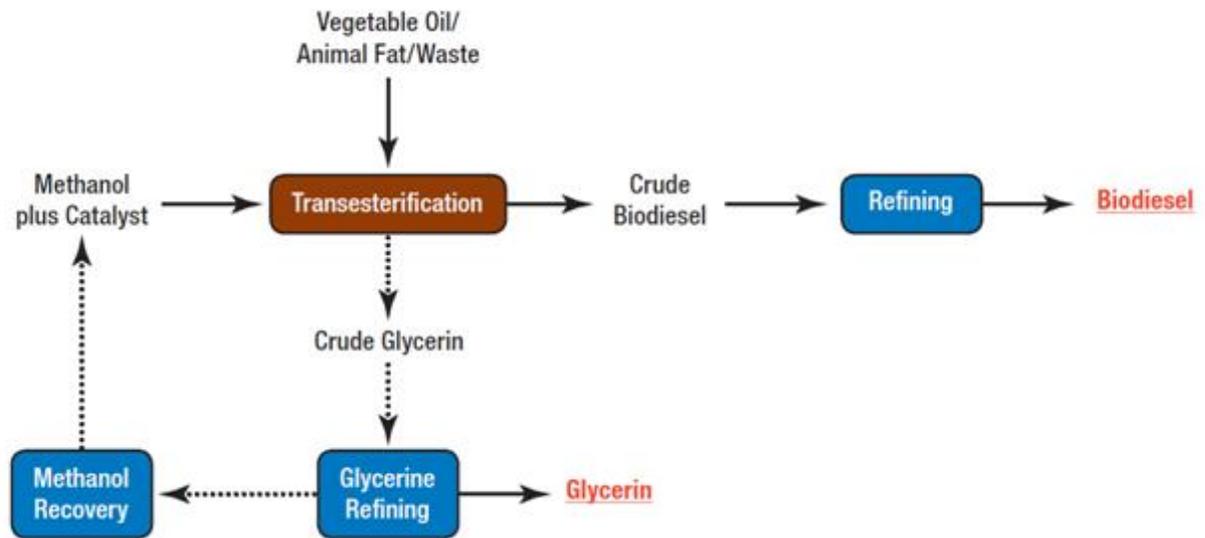


Figure 16 : Schéma de la voie de production de biodiesel

(Source : https://afdc.energy.gov/fuels/biodiesel_production.html)

3.2. Marché du biodiesel

Le biodiesel est le biocarburant le plus utilisé dans l'industrie. Les États-Unis dépendent principalement du soja et l'Europe du tournesol comme source d'huile végétale pour produire le biodiesel. Le besoin en biodiesel est en constante augmentation par rapport aux autres types de biocarburants, du fait de l'augmentation du nombre des véhicules diesel. Il existe plusieurs acteurs en France ayant obtenus des résultats satisfaisants en s'investissant dans le biodiesel en particulier et les biocarburants en général (comme les sociétés : CEA , Ademe, CRNS , IFP) (alaure.demarignan@ifp.f).

Il existe également plusieurs expériences et études pour investir dans les déchets de cuisson (notamment l'huile de cuisson) pour la production de biodiesel en Inde (Buhroo ,2018).

3.3. Production de biodiesel par *Saccharomyces cerevisiae*

Les microalgues sont capables de produire du biodiesel 200 fois plus efficace que les cultures traditionnelles (El-Dalatony *et al.*, 2017). Cependant, d'importants obstacles techniques (rareté des terres appropriées, manque de rayonnement actif impliquant la fourniture de lumière supplémentaire, d'engrais, du contrôle de la température et de la

protection contre les espèces envahissantes non productrices....) empêchent actuellement leur utilisation commerciale.

Les levures oléagineuses sont considérées comme une source alternative prometteuse de lipides pour la production de carburant biodiesel. En suivant cette théorie, une souche de levure indigène *Saccharomyces cerevisiae* isolée d'un brassage en laboratoire a été étudiée pour la production de biodiesel par une approche de transestérification in situ en utilisant la 1,1,3,3-tetraméthylguanidine comme catalyseur (Phukan *et al.*, 2019). Le développement de *S. cerevisiae* en tant qu'usine de cellules d'esters éthyliques d'acides gras représenterait une opportunité pour la production de biodiesel en raison de son histoire fructueuse dans le domaine de la biotechnologie (Valle-Rodríguez *et al.*, 2014).

4. Le biogaz

C'est un gaz issu de la décomposition de matières organiques (déchets organiques, charbon de bois industriel, biomasse algale), obtenu par deux procédés (Ribeiro-Leite *et al.*, 2021) : une gazéification et une digestion anaérobie.

4.1. Production de biogaz

La technique de gazéification est un procédé thermique (à 1200°C) qui utilise la pression et la vapeur pour convertir la biomasse (déchets organiques) directement en un gaz composé principalement de carbone et d'hydrogène (le procédé d'oxydation et de réduction comprend alors la pyrolyse et la conversion de la biomasse en énergie) (Buhroo, 2018).

Le méthane biogène quant à lui résulte de la digestion anaérobie des décharges organiques. Cette méthanogène peut se faire dans les digesteurs méthaniers (cuve cylindrique hermétique de stockage des déchets organiques), permettant la valorisation de différents déchets (déchets liquides ou solides d'élevage, eaux usées, boues industrielles, déchets industriels ou déchets municipaux (journaux, déchets alimentaires). Elle comprend trois étapes principales :

- Hydrolyse des protéines et des graisses en composés simples, acides aminés, peptides
- Formation d'acétate
- Conversion de l'acide acétique en méthane).

Le biométhane de première génération est actuellement utilisée dans le secteur industriel. Celui de la deuxième génération est en cours d'essai. La troisième génération de méthane est une transformation directe de microalgues cultivées dans des réacteurs de photosynthèse encore en cours de test (Demilly *et al.*, 2020).

4.2. Bacteries productrices de biogaz

Parmi les bacteries méthanogènes on peut citer *Methanococcus thermolithotrophicus* qui est une bactérie méthanogène coccoïde mobile thermophile autotrophe et qui a été isolée à partir de sédiments marins chauffés par géothermie près de Naples, en Italie (Huber, 1982).

5. Le Gaz de synthèse ou Syngas

C'est un intermédiaire obtenu par la gazéification de la pyrolyse de la biomasse et la décomposition catalytique des déchets organiques (1000°C) utilisés pour produire de l'éthanol et d'autres alcools et permet également la transformation du charbon en hydrocarbures liquides (El-Nagar et Ali Ghanem , 2019)

5.1. *Acetobacterium* sp. et la production de syngas

Le gaz de synthèse (Syngas) est un mélange gazeux composé principalement de H₂ de Co et de CO₂ et peut être dérivé de différentes sources y compris les matériaux renouvelables comme la lignocellulose (Bertsch et Müller, 2015). Les acétogènes sont des anaérobies obligatoires qui réduisent le CO₂ en carbone cellulaire pour la conservation d'énergie (Liew *et al.*, 2013). *Acetobacterium woodii* et *Methanospirillum hungatei* sont deux espèces acétogènes et méthanogènes qui peuvent être effectivement impliquées dans la décomposition anaérobie (Manimegalai *et al.*, 2014). Le biogaz est une des énergies qui nécessite une plus grande attention vers une production efficace de méthane en décomposition anaérobie, Cependant, la fermentation du gaz de synthèse en certains biocarburants à l'aide de bactéries acétogènes est limitée par deux choses (Bertsch et Müller, 2015) : métabolisme énergétique mal compris et manque d'outils génétiques sophistiqués pour la modification des acétogènes.

6. Le biohydrogène

L'hydrogène est l'élément le plus léger et le plus abondant de l'univers à 75 %. Il est rarement pur sur terre. La plupart de l'hydrogène se trouve dans les composés organiques et l'eau. De nombreuses entreprises développent actuellement des technologies pour exploiter l'hydrogène à pleine capacité en utilisant de nombreuses méthodes pour le produire : Technologie vapeur (plus courante), production d'hydrogène à l'aide de méthane à des températures élevées, électrolyse de l'eau.

Les micro-organismes sont également connus pour leur capacité à produire de l'hydrogène *Chlamydomonas reinhardtii* (micro-algue production de H₂), où lors de la photosynthèse ils produisent du sulfate d'hydrogène à la place de l'oxygène. Les scientifiques cherchent également à développer des méthodes de production d'hydrogène, car les cellules microbiennes anaérobies sont une usine de sa production. (Dinco *et al.*,2010)

La production biologique d'hydrogène est considérée comme la méthode la plus propre par rapport à d'autres méthodes telles que la vapeur, car elle ne produit pas de dioxyde de carbone (voir figure17).

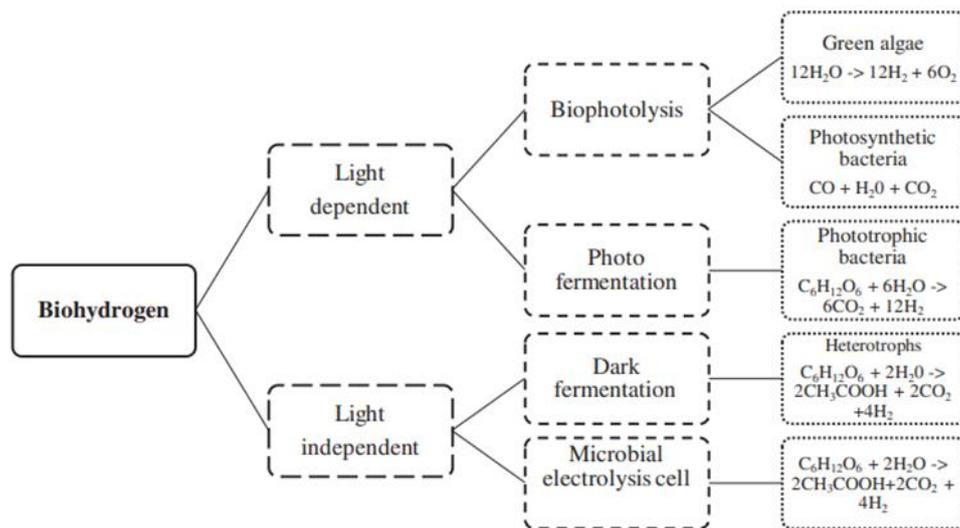


Figure17: Schéma des réactions chimique impliquées dans la production de biohydrogène à partir de la présence d'énergie lumineuse (Ribeiro leite *et al.*, 2021)

Il existe deux types de conversions hétérotrophes dans lesquelles les substrats organiques sont transformés en composés organiques plus simples avec production simultanée d'hydrogène moléculaire (Menia *et al.*, 2019) :

- La fermentation sombre réalisée par des bactéries anaérobies (*Clostridium spp*) qui transforment les hydrates de carbone en biohydrogène.
- La photo-fermentation réalisée par des bactéries photosynthétiques.

6.1.Production d'H₂ par *Clostridium spp*.

L'hydrogène est un carburant très prometteur pour le future en raison de son caractère respectueux de l'environnement et de son rendement énergétique élevé et qui peut être utilisé comme source d'énergie durable (Wang *et al.*, 2007 ;Xing *et al.*, 2008). Le genre

Clostridium est considéré comme l'un des principaux producteurs d' H_2 . On peut citer : *C. butyricum*, *C. pasteurianum* (Heligsmann., 2012)

6.2. Synthèse d' H_2 par biophotolyse de l'eau

Les cyanobactéries sont considérées comme des usines potentielles pour la production d'hydrogène (Yu et Takahashi, 2007 ; Ghiasian, 2019). La biophotolyse de l'eau peut se produire aussi par les algues vertes (Menia *et al.*, 2019). Elle peut être directe ou indirecte (Mudhoo *et al.* ; 2011, Gurtekin, 2014).

➤ Biophotolyse directe

Similaire à la photosynthèse des plantes et des algues vertes où l'énergie solaire est directement convertie en hydrogène via les réactions photosynthétiques suivantes :



Où : hv représente l'énergie d'un photon dans la lumière (h : constante de Planck et v : fréquence de la lumière).

L'avantage de cette méthode est que l'alimentation principale est l'eau qui est peu coûteuse et qui est disponible presque partout. Cependant, elle peut être limitée par (Gurtekin, 2014):

- Efficacité de conversion solaire de l'appareil photosynthétique.
- Processus de synthèse de H_2 qui doit être séparé des processus d'oxydation de H_2O .
- Conception et coût du bioréacteur.

➤ Biophotolyse indirecte

La biophotolyse indirecte se fait en deux étapes:

- La photosynthèse pour l'accumulation des glucides.
- La fermentation sombre du carbone servant à la production d'hydrogène.

7. Piles à combustible microbiennes MFC

Ce sont des réacteurs biochimiques qui traitent les déchets organiques pour produire de l'électricité, où les micro-organismes convertissent directement l'énergie chimique stockée dans la matière organique (glucides simples) en énergie électrique. Les microorganismes vivants agissent comme des biocatalyseurs et la cellulose est utilisée comme donneur d'électrons et la cellule constitue l'appareil qui fournit des réactions d'oxydoréduction biologiques (Rismani-Yazdi, 2008) (voir figure 18).

Comme exemples, les bactéries *Comamonas* spp et *Clostridium* spp sont placées dans la chambre anodique avec un matériau organique (la cellulose) en conditions anaérobies, où elle stimule les bactéries pour oxyder la matière organique et transférer les électrons résultants à l'électrode positive. Les protons se combinent avec les électrons et l'oxygène à la surface de la cathode pour former de l'eau.

En outre, des techniques de transfert direct d'électrons ont été pratiquées en utilisant des bactéries électriquement actives *Geobacter Sulfurreducens*, *Shewanella oneidensis* et *S. putrefecins* sp. Afin que le contact soit direct entre les cellules bactériennes et l'électrode, les bactéries sécrètent des médiateurs redox solubles et transfèrent des électrons à l'électrode pour générer de l'énergie électrique (Rismani-Yazdi, 2008 ; Dinco, 2010).

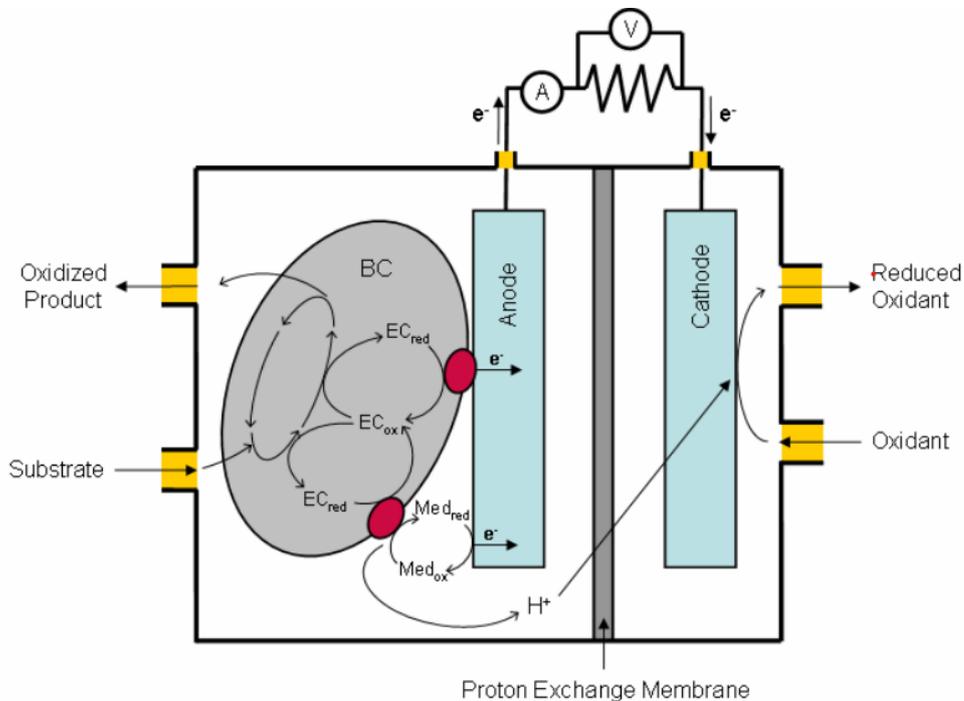


Figure18 : Schéma d'une pile à combustible microbienne contenant une cellule bactérienne (BC). Le transport d'électrons fait intervenir des porteurs d'électrons oxydés et réduits (ECred et ECo_x), et des médiateurs (Medox et Medred) (Rismani-Yazdi, 2008).

4. Utilisation des biocarburants

Tableau 03 : les utilisations des biocarburants

Biocarburant	Utilisations
Bioethanol	<ul style="list-style-type: none"> • supplément ou additif dans le secteur des transports (voitures, camions, trains et avions) il est ajouté en proportion variable à l'essence • production d'énergie thermique (chauffages au bioalcool) (Andrlova, 2013). • matière première dans la fabrication de nombreux produits chimiques (peinture détergente, agent antiseptique blanchissant...) • Fabrication de plastiques, conservateurs et boissons alcooliques <ul style="list-style-type: none"> • Industrie pharmaceutique, cosmétique, produits alimentaires (bioéthanol de deuxième génération) (EUBIA,2002-2006)
Biodiesel	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation dans le secteur des transports (comme carburant pour voitures, camions, avions, trains...) seul (moteurs spéciaux) ou comme additif (Arshad, 2018). • Le produit glycérine est utilisé dans la fabrication de nombreux cosmétiques, savons, produits pharmaceutiques (Boukhetia, 2010).
Syngas	<ul style="list-style-type: none"> • Il est utilisé dans la production d'alcools et d'hydrocarbures liquides (Boukhetia, 2010).
Biogaz	<ul style="list-style-type: none"> • Production d'électricité et de chaleur (stations d'épuration et usines de biogaz) (Andrlova, 2013).
Biohydrogène	<ul style="list-style-type: none"> • Il peut être utilisé dans les moteurs de voitures et de bateaux comme carburant • Pour les besoins énergétiques des bâtiments et des maisons • Source d'alimentation pour appareils électroniques portables (Aspirations). (Dinco <i>et al.</i>,2010)
MFC	<ul style="list-style-type: none"> • production d'électricité (Rismani-Yazdi, 2008).

**Chapitre III : La production du bioéthanol à partir
de biomasse lignocellulosique et l'apport
du génie génétique**

La biomasse lignocellulosique est constituée de bois, paille, mauvaises herbes, résidus de cultures, déchets agricoles et déchets forestiers. Ses ressources les plus populaires sont les arbres à croissance rapide et les herbes comme l'eucalyptus, le chanvre et le miscanthus (voir figure 19). Leur utilisation comme matière première pour la synthèse de bioéthanol constitue une meilleure alternative à celui d'origine fossile et la plus durable au regard de la masse énorme obtenue facilement (491 milliards de litres/ans de déchets agricoles) (Archad, 2018). Ce qui la distingue aussi c'est qu'il s'agit d'une biomasse non alimentaire abondante et bon marché (Koita, 2012)

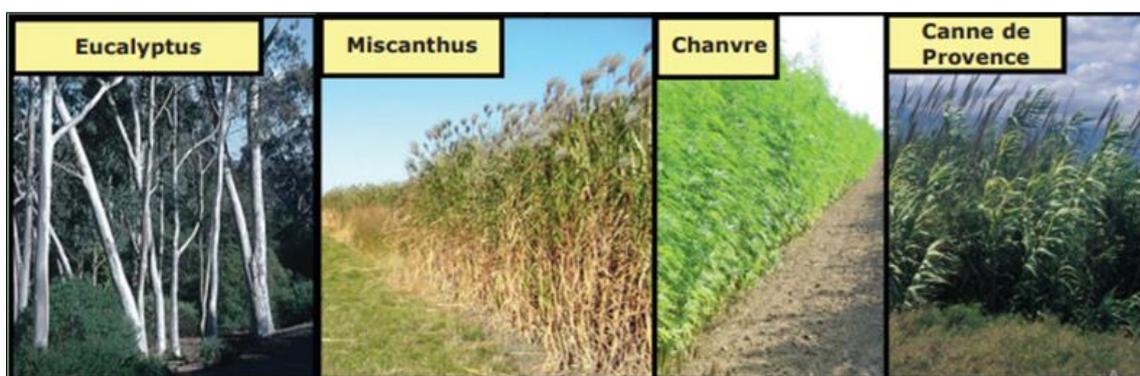


Figure 19 : Les ressources les plus populaires pour le bioéthanol lignocellulosique (EUBIA, 2002-2006)

Le bioéthanol appartient aux biocarburants de deuxième génération (déchets de bois issus de l'agriculture). La biomasse lignocellulosique a un grand potentiel économique, elle fournit 70 % des sucres convertibles sans être une menace pour l'écosystème et sans affecter l'approvisionnement alimentaire (Maarouf, 2020).

Cependant, l'un des défis de production les plus importants est la difficulté de décomposer cette biomasse en sucres simples et sa capacité à résister aux enzymes en raison de sa structure cristalline imperméable. Pour relever ce défi, les scientifiques ont utilisé la stratégie du génie génétique pour améliorer la capacité des microorganismes à produire de

l'éthanol lignocellulosique, ainsi que pour modifier la chimie de la lignine et améliorer les propriétés des plantes (Zhang *et al.*, 2019).

La modification a également touché les gènes codant pour les enzymes hydrolysant la lignine (Tiangang ,2010). Donc on est passé à des produits de 4^{ème} génération de biocarburants.

1. La conversion de la biomasse lignocellulosique

La lignocellulose est un composé polymère tridimensionnel complexe (voir figure20) composé de trois parties principales : cellulose (45 % en poids sec), hémicellulose (30% en poids sec) et lignine (25% en poids sec) (Koita, 2012)

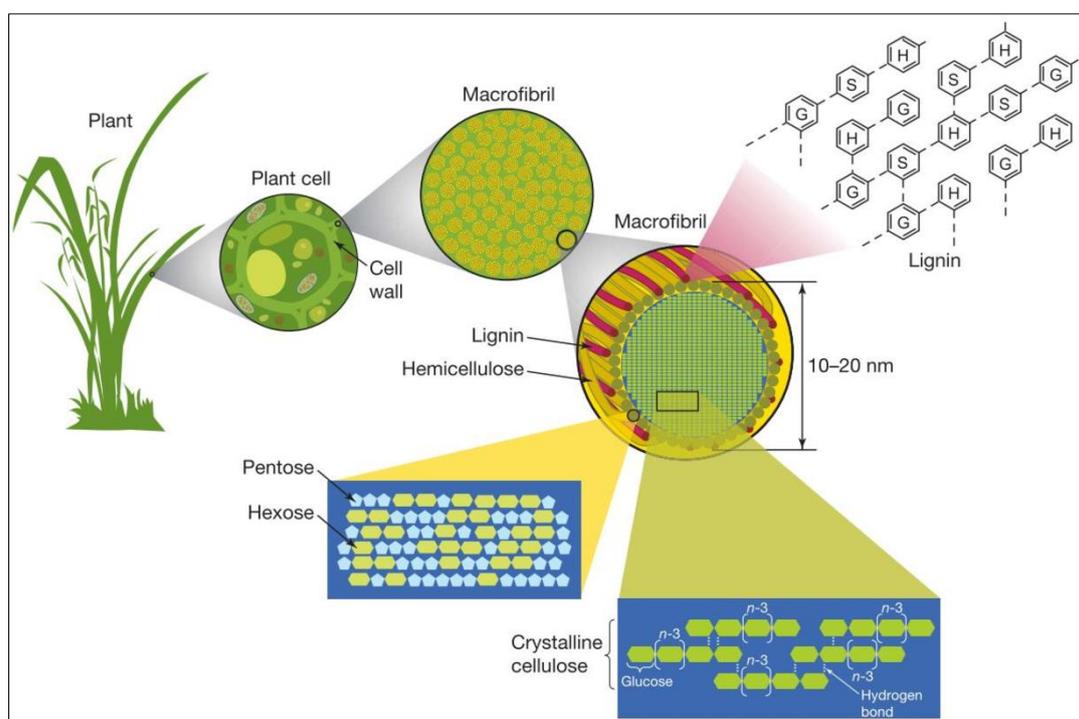


Figure20 : Structure chimique de la biomasse lignocellulosique (Eibner, 2015)

La biomasse lignocellulosique est convertie en bioéthanol à travers trois étapes de base :

- Le prétraitement qui permet la destruction de matrices complexes d'hémicellulose et de lignine
- L'hydrolyse qui permet de libérer les sucres fermentescibles
- La fermentation ou la transformation microbienne (Alfenor et Molina-Jouve, 2016).(voir figure 21)

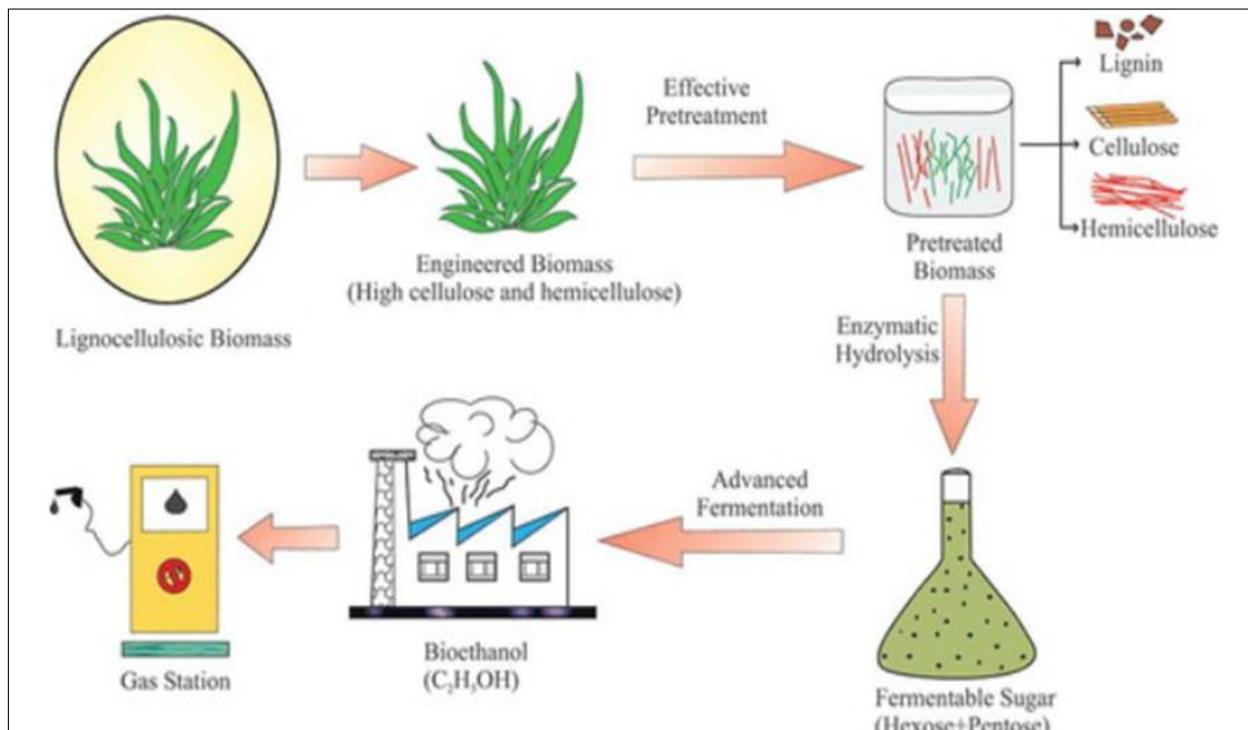


Figure 21 : Schématisation de la production de bioéthanol lignocellulosic (Lamichhane *et al.*, 2021)

1.1. Prétraitement de la biomasse

Il se fait par dissolution et ouverture de la lignine tout en évitant la formation de sous-produits pouvant inhiber les étapes ultérieures. Il permet d'augmenter la porosité des matrices fibreuses pour favoriser la pénétration des enzymes dans la structure et libère la cellulose des lignines et des hémicelluloses (An Tran *et al.*, 2019).

Des méthodes physiques, chimiques et biologiques sont utilisées pour le prétraitement de la lignocellulose (Archad, 2018). Le tableau 04 représente les procédés de traitement les plus importants avec leurs avantages et inconvénients.

Tableau 04 : les Avantages et les inconvénients des différentes méthodes de prétraitement des matériaux lignocellulosique (Archad, 2018).

Traitement primaire	Avantages	Inconvénients
Biologique	-Décomposition facile de lignine et hémicellulose. -énergie minimale.	- Requisite pour la réaction d'hydrolyse - trop lent.
Le broyage	- La structure cristalline de la cellulose peut soulager.	- Energie supplémentaire requise.
Une explosion de vapeur	- Transforme la lignine en ses composants facilement. - Une meilleure libération des molécules de glucose.	-Libère des substances toxiques. -Complexes résidentiels. -Dégradation partielle de hémicellulose.
L'explosion de dioxyde de carbone	- Expose une grande partie de la surface. - Meilleur coût. - Ne génère pas de composés toxiques.	Une haute pression est requise.
Oxydation humide	Meilleure extraction du lignine Faible formation d'inhibiteurs.	Coûteux.
Dissolution organique	Décomposition efficace de la lignine et hémicellulose	Peut provoquer un drainage et de problèmes environnementaux.
Acide dilué	- Moins de problèmes de corrosion par rapport à acide concentré.	Des sous-produits acides concentrés se forment.
Concentré acide	meilleure production de glucose	Récupération de l'acide est essentielle.

1.2. L'hydrolyse

Après prétraitement de la lignocellulose, les chaînes des polysaccharides générés sont soumis à l'action d'enzymes agissent pour les briser et convertir l'hémicellulose et la cellulose en sucres simples fermentescibles (glucose et xylose). L'enzyme commercialisée pour hydrolyser la cellulose et l'hémicellulose est en fait un mélange de différents types d'enzymes, communément appelées cellulase, extraites de micro-organismes (An Tran *et al.*, 2019).

1.3. La fermentation

Des micro-organismes sont employés pour métaboliser les sucres simples libérés de l'hydrolyse enzymatique afin de les convertir en bioéthanol et dioxyde de carbone. Quelques exemples les plus utilisés sont *Saccharomyces cerevisiae*, *Zynomonas mobilis* et *Escherichia coli* (Koita, 2012). Le tableau 05 représente certains micro-organismes populaires pour la production de bioéthanol et quelques caractères biochimiques.

Tableau 05 : Quelques micro-organismes populaires pour la production de bioéthanol (AnTran *et al.*,2019).

Caractère	Microorganisms		
	<i>E.coli</i>	<i>Z.mobilis</i>	<i>S.cerevisiae</i>
Fermentation D-glucose	+	+	+
Autres hexoses utilisés (D-galactose et mannose)	+	-	+
Utilisation des pentoses (D-xylose et L-arabinose)	+	-	-
Utilisation directe d'hémicellulose	-	-	-
Fermentation anaérobie	-	+	+
Formation d'un mélange de produits	+	F	F
Productivité élevée en éthanol (à partie de glucose)	-	+	+
Tolérance à l'éthanol	F	F	+
Tolérance aux inhibiteurs dérivés de la lignocellulose	F	F	+
Gamme de pH acide	-	-	+
+ positive, – negative, F faible			

Selon An Tran et ses collaborateurs, en 2019, deux approches existent :

- Une hydrolyse et fermentation séparées et successives ou les microorganismes sont ajoutés au mélange après l'hydrolyse. Cette méthode présente certains points faibles inhérents, notamment la contamination, la formation d'inhibiteurs et l'exigence de plus de temps et d'équipements supplémentaires.
- L'hydrolyse enzymatique et la fermentation des microorganismes simultanément, ou les enzymes et les micro-organismes sont chargés au même temps dans le mélange. Cette méthode s'est avérée bien meilleure avec un temps plus court, moins d'équipement et un risque de contamination minimisé.

La production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique est encore à l'étude et à l'amélioration et n'a pas encore atteint l'échelle commerciale. Elle est également confrontée à de nombreux obstacles et problèmes (Bouhro, 2018).

2. Les problèmes rencontrés dans ce processus

L'un des défis les plus importants est que la majorité des micro-organismes sont incapables de métaboliser les pentoses (C5) tandis qu'ils consomment facilement les hexoses (C6) tel que le glucose (Al-Haj, 2014).

La structure de la biomasse lignocellulosique est aussi un des problèmes majeurs auxquels est confrontée la production. Elle est résistante à la décomposition en raison de son hétérogénéité structurale, car ses composés sont fortement liés par des liaisons covalentes et hydrogène (Robak et Balcerek.,2018).

En plus de la formation de nombreux inhibiteurs lors du prétraitement et de la décomposition enzymatique. Ces inhibiteurs (tels que les acides organiques, l'acide formique et l'acide acétique) créent un environnement hostile pour les microorganismes fragilisant et réduisant leur taux de croissance, ce qui affecte négativement la production (Robak et Balcerek, 2018)

3. Solutions qu'apporte le génie génétique

3.1. Modification génétique de la bactérie

La conversion de xylose en éthanol, la compatibilité microorganisme-enzyme et les faibles taux d'hydrolyse de la cellulose constituent des défis qui freinent la fermentation de l'éthanol. Des efforts ont été déployés pour améliorer la fermentation de l'éthanol à partir de xylose. Cependant, les faibles rendements en éthanol, la formation de sous-produits, le pH neutre requis pour la croissance et l'intolérance à une concentration élevée en éthanol sont des inconvénients de l'utilisation de bactéries dans la fermentation à grande échelle. Récemment, la recherche s'est concentrée sur le développement de procédés améliorés et l'usage des micro-organismes recombinants, toutefois, des investigations plus approfondies sont encore nécessaires. (Lin et Tanaka., 2006)

Saccharomyces cerevisiae et *Zymomonas mobilis* sont les biocatalyseurs industriels de choix pour la fermentation des sucres en éthanol. Cependant, leur incapacité à métaboliser les pentoses limite leur utilisation dans la fermentation des sucres lignocellulosiques. Ce vide est comblé par *Escherichia coli* recombinante portant les gènes codant pour la pyruvate décarboxylase et l'alcool déshydrogénase de *Z. mobilis*. Les productivités spécifiques et volumétriques de ces souches d'*E. coli* sont proches de celles de la levure avec en plus l'avantage de pouvoir fermenter tous les sucres de la biomasse en éthanol en milieu de sels minéraux sans nutriments complexes comme l'exige la levure (Shanmugam *et al.*, 2020).

Compte tenu de la grande plasticité du génome d'*Escherichia coli* rendant les manipulations génétiques aisées, elle a été la meilleure candidate pour la transformation génétique bien qu'à la base, elle n'est pas productrice de l'éthanol. En fonction des modifications apportées à son génome, elle présente l'avantage de pouvoir utiliser tout type de substrat, et notamment les pentoses et hexoses formant les hémicelluloses (Boucher, 2014).

La souche KO11 est une souche d'*Escherichia coli* éthanologène de référence actuelle. En plus de l'ingénierie métabolique visant à améliorer la production d'éthanol, la souche a été soumise à plusieurs séries d'expériences d'évolution dirigée. Ces expériences ont clairement abouti à une souche avec une capacité améliorée à produire de l'éthanol. La compréhension de ces modifications génétiques permettra l'identification de gènes (dont certains peuvent être nouveaux ou inattendus) qui seront les clés des futures recherches sur l'amélioration de l'éthanologénèse <https://genome.jgi.doe.gov/portal/escck/escck.home.html>

Cette souche éthanologène (KO11) était capable de convertir le glucose et le xylose en éthanol avec des rendements de 103 à 106 % de la valeur théorique. De plus, KO11 se développe plus rapidement sur un milieu contenant des xyloses que sa souche parente ATCC11303. Au cours de la combinaison, deux gènes sont nécessaires, un pour le pyruvate décarboxylase et un autre pour l'alcool déshydrogénase. Ces enzymes travaillant ensemble dans la cellule détourneront le pyruvate des autres produits de fermentation vers l'éthanol. Les étapes par *E. coli* initial et *E. coli* éthanologène dans la fermentation alcoolique sont présentées sur la figure 3 (Lin. Y et Tanaka. S; 2006)

Escherichia coli KO11

Un objectif central du ministère de l'Énergie et du Centre de recherche sur la bioénergie des Grands Lacs est d'éliminer les obstacles à l'éthanologénèse cellulosique microbienne économique. En particulier, la recherche au GLBRC vise à générer une meilleure compréhension des processus cellulaires associés aux goulots d'étranglement actuels dans la conversion de la cellulose en éthanol. Plusieurs éléments de preuve indiquent qu'un goulot d'étranglement critique actuel est la capacité d'*E. coli* à convertir les sucres dérivés de la cellulose en éthanol (Keating, 2008) (voir figure 22)

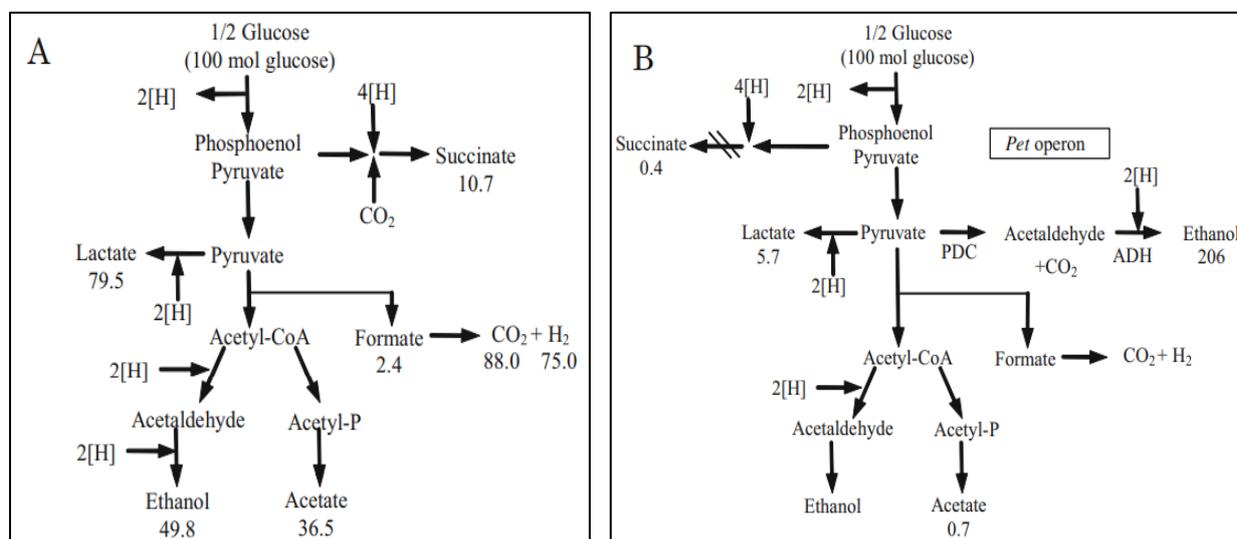


Figure 22 : (A) Produits de fermentation typiques fabriqués par un *Escherichia coli* K12 fermentant du glucose. Les produits sont exprimés en moles produites pour 100 moles de glucose fermenté avec 91% du carbone représenté comme produits de fermentation.

(B) *E. coli* transformée avec « l'opéron *pet* » détourne presque tout le glucose en éthanol. Cette souche (KO11) porte également une mutation qui bloque la production de succinate. (Lin et Tanaka., 2006)

3.2. Modification génétique de la biomasse

L'étude et compréhension de la biosynthèse de la paroi cellulaire des plantes et des propriétés de leur structure et leur dégradation par des enzymes améliore et accélère le processus et les méthodes de décomposition de la biomasse. Ceci peut être réalisé par l'ingénierie de la structure de la paroi cellulaire végétale. La connaissance des gènes impliqués dans la biosynthèse de la paroi cellulaire (la majorité inconnue) et de leurs fonctions est impérative pour formuler des stratégies de modification génétique des caractères de la biomasse (Kent, 2015).

L'une des études les plus importantes sur la conception de la paroi cellulaire modifiée. La liaison du monomère de lignine a été modifiée, ce qui a amélioré la capacité de digestion des polymères de lignine. Il a grandement simplifié la gravure enzymatique des matériaux celluloses. Les modifications de la paroi cellulaire peuvent également affecter la capacité de la plante à résister aux stress et aux maladies indésirables (U.S. DOE, 2015).

Ces découvertes motivent la poursuite des recherches sur la structure de la paroi cellulaire et la biosynthèse pour faciliter la compréhension de la formation de la biomasse et augmenter la qualité des bioproduits. Cependant, ces recherches n'en sont qu'à leurs premières étapes (U.S. DOE, 2015).

Conclusion

Le biocarburant est un carburant produit à partir de la conversion de la biomasse qui fait encore l'objet de recherches et d'améliorations. Le début fut avec la première génération produite à partir de matières premières végétales, qui se heurta à de nombreux obstacles dont le plus important était la concurrence avec l'alimentation humaine et animale. Après sont apparues les biocarburants de la deuxième génération produits principalement à partir des déchets agricoles. La difficulté de la conversion de la biomasse a incité les chercheurs à opter pour la troisième génération produite à partir de microorganismes (notamment les microalgues) et à développer de nouvelles voies en utilisant le génie génétique pour des produits de quatrième génération.

L'éthanol et les esters méthyliques des huiles végétales constituent les principaux biocarburants produits et consommés aujourd'hui. Cependant, d'autres types prennent un peu plus d'importance ou commencent à apparaître.

A travers cette recherche bibliographique sur ce sujet, nous concluons que les biocarburants peuvent être un concurrent sérieux des combustibles fossiles en raison de leurs multiples avantages, tels qu'être une énergie durable et renouvelable, une source de développement économique sûre et respectueuse de l'environnement à un certain seuil. Cependant, cette technologie a encore besoin de développement et d'amélioration sur le plan qualité et coût, en plus, dans le secteur des transports, ces produits ne sont -pour la plupart- pas disponibles pour une utilisation dans les moteurs actuels. Un autre inconvénient étant l'épuisement et la pollution des réserves d'eau ainsi que la pollution des terres engendrée par le processus globale de production des biocarburants particulièrement ceux de la 1^{ère} génération (de vastes terres agricoles utilisées, des engrais, leur transformation industrielle et leur distribution).

Mais à l'avenir, si un soutien suffisant est apporté aux chercheurs dans ce domaine, on s'attend à ce que ce soit une alternative réussie aux combustibles fossiles. Le plus grand défi sera à ce moment de produire de grandes quantités capables de couvrir la demande du marché en combustibles avec un budget inférieur et une meilleure qualité.

L'investissement dans des biocarburants de deuxième génération issus de biomasse lignocellulosique (résidus agricoles ou mauvaises herbes) à haut rendement avec l'utilisation du génie génétique pour améliorer les agents producteurs (microorganismes) peut aider à surmonter la difficulté de convertir la lignocellulose et génère ainsi un nouvel horizon dans lequel les déchets sont recyclés. Ceci crée de nombreux emplois et contribue au développement économique.

Cependant, une lourde perspective d'avenir se dessine remettant en question l'intérêt des biocarburants, c'est que l'utilisation actuelle de la biomasse pour produire les biocarburants ne privera-t-elle pas les générations futures de reconstituer les stocks de pétrole à partir de la matière organique animale ou végétale ?...

Références bibliographiques

Le style de rédaction de la liste des références bibliographiques suit la norme ISO-690:2010

Abdrezzak B.,(2017). La biomasse (Les biocarburants et le biogaz). Université Djilali Bounaama de Khemis Miliana Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Technologie Poly.

<https://pdfcoffee.com/-utf8-b-ug9sewnvcgndqv9fbmvyz2llcybszw5vdxzlbfgfibgvzx2nvdxjzlnbkzg-pdf-pdf-free.html>

Alfenore S, Molina-Jouve C.,(2016).De la conversion microbienne des ressources lignocellulosiques pour la production de molécules énergétiques : verrous et perspectives. Innovations Agronomiques. 54 (2016), 89-104.[en ligne].

DOI:10.15454/1.5137738413400696E12

Al-Haj L- A., (2014).Development of genetic engineering tools for the cyanobacterium *Synechocystis* PCC 6803 for advanced biofuel production London.thèse de doctorat. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy: Department of Structural and Molecular Biology .UniversityCollegeLondon.Disponible sur

<https://www.semanticscholar.org/paper/Development-of-genetic-engineering-tools-for-theAlHaj/ad03948e1302464a339db16b47d2a2e64ef69ada>

Andrlova K., (2013). Optimization of bioethanol production by *Zymomonas mobilis*.thèse de doctorat. University Brno Faculty of Chemistry.Purkyňova.Disponible sur <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/21040>

Antoni D, Zverlov V-v, Schwarz W-H., (2007).Biofuels from microbes. Appl Microbiol Biotechnol .77. P.23-35. [en ligne].

<https://doi.org/10.1007/s00253-007-1163-x>.

AnTran T, PhungLe T, Mai T-P , Nguyen D-Q., (2019). Bioethanol production from lignocellulosic biomass. ReseachGate.[en ligne].

DOI:10.5772/intechopen.86437.

Archad M., (2018). An overview of biofuel .ReseachGate.Pakistan.p:1-37. .[en ligne].

DOI: 10.1007/978-3-319-66408-8_1

Benemann J R, Pedroni P., sans date. Biological production of H₂: mechanisms and processes. New developments: energy, transport, sustainability.in Hydrocarbons. [en ligne].

https://www.treccani.it/portale/opencvms/handle404?exporturi=/export/sites/default/Portale/sito/altre_a_ree/Tecnologia_e_Sienze_applicate/enciclopedia/inglese/inglese_vol_3/337-360_ing.pdf&%5D

Bertsch J, Müller V., (2015). Bioenergetic constraints for conversion of syngas to biofuels in acetogenic bacteria. *Biotechnology for Biofuels*. [en ligne]

DOI 10.1186/s13068-015-0393-x.

Bi C, Zhang M, Ingram-O , Preston. J-F., (2009). Genetic engineering of *Enterobacter asburiae* strain JDR-1 for efficient D (-) lactic acid production from hemicellulose hydrolysate. *Biotechnology Letters*.2009.P. 1551–1557.[en ligne].

DOI: 10.1007/s10529-009-0044-z.

Bobin, J. L., Huffer, E., et Nifenecker, H. (2021). 11-Les effets sanitaires des combustibles fossiles. In *L'énergie de demain* (pp. 253-276). EDP Sciences.[en ligne].

<https://doi.org/10.1051/978-2-7598-0129-9-012>.

Boucher J.,(2014). Etude des possibilités de production d'éthanol hémicellulosique dans le cadre d'une bioraffinerie papetière. Thèse de doctorat. Génie des procédés. Université de Grenoble., Français. Disponible sur

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01278355/document>

Buhroo Z-I.,(2018).Biofuels and their future perspectives.ResearchGate. [en ligne].

<https://www.researchgate.net/publication/323425399>

Cellier, P., et Genermont, S. (2016). L'agriculture entre pollution atmosphérique et changement climatique.[en ligne].

https://www.appa.asso.fr/wpcontent/uploads/2020/03/Cellier_Genermont_2016.pdf

Chisti Y.,(2007). Biodiesel issu de microalgues.ELSEVIER. 25N°3.[en ligne]

<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>

Chojnacka K., (2010). Fermentation products.in *Chemical engineering and chemical process technology*, 5.[en ligne].

<http://www.eolss.net/sample-chapters/c06/e6-34-09-09.pdf>

CORCOS P- O., (2013). Optimisation de production de bioéthanol à partir d'hydrolysats de matière lignocellulosiques, de l'échelle laboratoire à la plateforme pilote. Mémoire de maitrise. Université de Sherbrooke (Québec) Canada. Disponible sur

https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/14511/Corcos_Pierre_Olivier_MScA_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Cortez L, Leite R-D C., (2012). Relation Between Biofuels versus Fossil Fuels. Petroleum Engineering Downstream. Encyclopedia of Life Support Systems.in PETROLEUM ENGINEERING-DOWNSTREAM. [en ligne] .

<http://www.eolss.net/sample-chapters/c08/e6-185-21.pdf>

Cuenca M-D S, Molina-Santiago C, Gomez-Garcia M -R, Ramos J- L., (2016). A Pseudomonas putida double mutant deficient in butanol assimilation: a promising step for engineering a biological biofuel production platform. FEMS Microbiology Letters, Vol. 363, No. 5. [en ligne].

<https://doi.org/10.1093/femsle/fnw018>

Danico D-S, Granoff E-C, Molenda E-C, Ryel M-L., (2010). Biofuels. Retrieved from.[en ligne].

<https://digitalcommons.wpi.edu/iqp-all/>

Daudin A, Maury S, Valée C., (2012). Production de biocarburants a partir de la ressource oleagineuse. OCL 2012,19(N°1), P 29-38. [en ligne].

DOI: 10.1684/ocl.2012.0433.

David C., (2015). Les biocarburants liquides dans les transports. Hygiène et sécurité du travail-n°239.[en ligne]

<https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=VP%209>

Demilly M -S , cesarini J-C ,bertrand P., (2020) .Rapport d'information déposé en application de l'article 145 du règlement par la mission d'information (1) sur les agrocarburants au nom de la commission du développement durable et de l'aménagement du territoire, n° 2609. [en ligne].

https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cion-dvp/115b2609_rapport-information

Dorin B, Gitz V., (2008). Écobilans de biocarburants : une revue des controverses. Natures Sciences Sociétés, 16(4), 337-347[en ligne].

<https://www.cairn.info/revue-natures-sciences- societes --.htm>.

Drogué S. , (2012).[en ligne].

<https://ageconsearch.umn.edu/record/140189/files/iss12-01.pdf>.

Dunn K L.,(2015). Engineering Zymomonas mobilis for the production of biofuels and other value-added products.thèse de doctorat.Dissertation Submitted in partial fulfillment of the requirements for

the degree of Doctor of Philosophy in Chemical Engineering in the Graduate College .University of Illinois at Urbana-Champaign. Disponible sur <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/88278/DUNN-DISSERTATION-2015.pdf?sequence=1>

Dusséaux S., (2014). Ingénierie métabolique de *C. acetobutylicum* pour la production d'isopropanol. Thèse de doctorat. Ingénieries microbienne et enzymatique. université de Toulouse. Disponible sur <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01179195/document>.

Égalité, L. F.(2008). L'industrie pétrolière en 2007. Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières - Direction des Ressources Énergétiques et Minérales.[en ligne].
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/021/42021938.pdf

Eibner S. ,(2015).Pyrolyse flash de biomasse lignocellulosique : comment catalyser la désoxygénation au cours des mécanismes primaires et secondaires ?. Thèse de doctorat L'Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et del'Environnement (2iE, Ouagadougou) et L'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier. Disponible sur <https://agritrop.cirad.fr/583404/1/these%20Eibner%20Simon%20final.pdf>

El-Dalatony M, Salama E, Kurade M, Hassan S-H A, Oh S E, Kim S, Jeon B H., (2017). Utilization of Microalgal Biofractions for Bioethanol, Higher Alcohols, and Biodiesel Production. A Review.Energies,10(12).2110.[en ligne].

<https://doi.org/10.3390/en10122110>

El-Nagar A, Ali Ghanem A., (2019) . Syngas Production, Properties, and Its Importance.[en ligne].

DOI: 10.5772/intechopen.89379

Espinosa M, María R., (2020). Introductory Chapter: A Brief Overview on Fermentation and Challenges for the Next Future. New Advances on Fermentation Processes. [en ligne].

DOI: 10.5772/intechopen.89418.

EUBIA., (2002-2006). Production et Utilisation du Bioéthanol , Brochure produite dans le cadre du projRESTMAC- FP6 . Brussels (Belgique) : 16 p. [en ligne].
[https://www.docdeveloppementdurable.org/file/Energie/biodiesel/RESTMAC_Bioethanol_FRENCH%20\(1\).Pdf](https://www.docdeveloppementdurable.org/file/Energie/biodiesel/RESTMAC_Bioethanol_FRENCH%20(1).Pdf)

Feng W., (2009).Biofuels in China: Opportunities and Challenges. In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant, 45(N°3), P342-349.[en ligne].

DOI: 10.1007/s11627-009-9209-7

Franck F., (2012). Une brève histoire des centres réactionnels de la photosynthèse. Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège .Volume 81 - Année 2012,p 143 – 146.[en ligne]. <https://popups.uliege.be/0037-9565/index.php?id=3922>.

Francois-Lopez E., (2016). Production de bio-hydrogène par fermentation obscure: Potentiel de différentes biomasses et variabilité microbiennes.thèse de doctorat. université de Strasbourg. Disponible sur

<https://www.theses.fr/2016STRAF040.pdf>.

JGI, genom portal, US departement of energy
<https://genome.jgi.doe.gov/portal/escck/escck.home.html>

Gerali F.,(2020). Biofuels, Engineering and Technology History Wiki.[en ligne]. <https://ethw.org/Biofuels>

Ghiasian M.,(2019). Biophotolysis-Based Hydrogen Production by Cyanobacteria. Prospects of Renewable Bioprocessing in Future Energy Systems.vol (10). pp 161-184.[en ligne]. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-14463-0_5.

Goldemberg J., (2008). The Brazilian biofuels industry. Biotechnology for biofuels, 1(1), 1-7. [en ligne].

<https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/1754-6834-1-6>.

Gürtekin E.,(2014). Biological Hydrogen Production Methods. ISEM2014 Adiyaman – TURKEY. [en ligne].

<http://www.i-sem.info/PastConferences/ISEM2014/ISEM2014/papers/A10-ISEM2014ID80.pdf>

He M, Wu B, Qin H, Ruan Z Y, Tan F R, Wang J L, Shui Z X, Li Chun Dai, Qi L- Z, Ke P, Xiao Y- T, Wen G- W, Qi C- H.,(2014). Zymomonas mobilis: a novel platform for future biorefineries. Biotechnology for Biofuels7. [en ligne].

<http://www.biotechnologyforbiofuels.com/content/7/1/101>.

Hebert J., (2013). Quel avenir pour le développement des biocarburants de deuxième génération au Québec. En vue de l'obtention du grade de Maitrise en environnement. Université de Sherbrooke.Disponible sur

<http://hdl.handle.net/11143/7230>.

Heger S, Bluhm, K, Brendt J, Mayer P, Anders N, Schaeffer A, Seiler T-B, Hollert H., (2016). Microscale in vitro assays for the investigation of neutral red retention and ethoxyresorufin-O-deethylase of biofuels and fossil fuels. Plos one, 11(9), e0163862[en ligne].

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163862>.

Hiligsmann S.,(2012). Production de biohydrogène par fermentation anaérobie chimiotrophe de substrats carbohydratés.Thèse de doctorat. Université de Liège. Centre Wallon de Biologie Industrielle. Disponible sur

http://bictel.ulg.ac.be/ETD-db/collection/available/ULgetd-04242012-141141/restricted/These%20S%20Hiligsmann_Biohydrogen_2012.pdf.

Huber H, Thomm M, König H, this G ,Stetter K-O.,(1982). Methanococcus thermolithotrophicus, a novel thermophilic lithotrophic methanogen. Arch. Microbiol. 132, 47–5). [en ligne].

DOI.10.1007/BF00690816.

Hwangbo M , Chu K-H., (2020). Recent advances in production and extraction of bacterial lipids for biofuel production. Science of The Total Environment 734(1).ResearchGate.[en ligne].

DOI :org/10.1016/j.scitotenv.2020.139420.

Kapogbembou D., (2011).Procédé de fabrication de biocarburants a partir de biomasse lignocellulosique biologiquement destructurée.Thèse en Géochimie Organique. Université de Poitiers. Disponible sur

<http://theses.univ-poitiers.fr/notice/view/10022>

Keating.,(2008).[en ligne].

<https://genome.jgi.doe.gov/portal/escck/escck.home.html>

Kent Peters.N.,(2015). Basic research opportunities in genomic science to advance the production of biofuels and bioproducts from plant biomass. Office of Biological and Environmental Research. [en ligne].

DOE/SC-0177

Khiari K.,(2016).Contribution à l'étude des propriétés thermo-physiques des biocarburants de seconde génération et leur influence sur le comportement des moteurs. Thèse de doctorat . Génie des procédés. Ecole des Mines de Nantes, Français. Disponible sur

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01493371>

Koita K., (2012). Optimizing pentose sugar utilization in Escherichia coli for the production of biofuels. These de doctorat .university of Illinois at urbana-champaign. Disponible sur

<https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/34403>

Koizumi T.,(2015). Biofuels and food security. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol (52), 829-841. [en ligne].

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.041>

Koppolu V , Vasigala V- KR.,(2016). Role of Escherichia coli in Biofuel Production. Microbiology Insights 9:29_35. [en ligne].

DOI: 10.4137/MBLS10878

Kumar R, Kumar P., (2017). Future microbial applications for bioenergy production : a perspective. Frontiers in Microbiology OPINION.[en ligne].

DOI:10.3389/fmicb.2017.00450

Lamichhane G, Ashis A, Darbin K- P, Babita A, Narayan G, Purushottam N, Sita Ram P, Prakriti B, Ganesh Bk, Niranjana P., (2021). Recent advances in bioethanol production from Lignocellulosic biomass, International Journal of Green Energy, 18:7, 731-744. [en ligne].

DOI: 10.1080/15435075.2021.1880910

Lavoie I , Laurion I , Vincent W F.,(2007). Les fleurs d'eau de cyanobactéries, vulnérabilité des prises d'eau. Québec, INRS Eau, Terre et Environnement. rapport no°919, v, 17. [en ligne].

isabelle.laurion@ete.inrs.ca

Le L T, van Ierland C-E, Zhu X, Wesseler J, Ngo G., (2013). Comparing the social costs of biofuels and fossil fuels : a case study of Vietnam. Biomass and bioenergy.ELSEVIER. 54, 227-238. [en ligne].

DOI: 10.1016.2013.04.004.

Liew F M, Köpke M, Simpson S D.,(2014). Gas Fermentation for Commercial Biofuels Production. Gaseous and Solid Biofuels - Conversion Techniques.[en ligne].

DOI: 10.5772/52164

Lin Y, Tanaka S.,(2005). Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. Appl Microbiol Biotechnol (2006) 69: 627–642. [en ligne].

DOI :10.1007/s00253-005-0229-x.

Lin Z., (2013). Microalgal growth and lipid production from organic waste. Thèse de doctorat. La Faculté des études supérieures de l'Université d'Akron. Disponible sur

[https://www.google.com/search?q=Lin+Z.+\(2013\)+MICROALGAL+GROWTH+AND+LIPID+PRODUCTION+FROM+ORGANIC+WASTE.+Th%C3%A9se+de+doctorat%E2%80%A6.&aq=chrome..69i57.3571j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8](https://www.google.com/search?q=Lin+Z.+(2013)+MICROALGAL+GROWTH+AND+LIPID+PRODUCTION+FROM+ORGANIC+WASTE.+Th%C3%A9se+de+doctorat%E2%80%A6.&aq=chrome..69i57.3571j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8)

Liu T, Khosla C.,(2016). Genetic engineering of Escherichia coli for biofuel production. [en ligne].

DOI : 10.1146/ -102209-163440

Maarouf Abdou Alio,2020. Production de bioéthanol à partir d'une biomasse lignocellulosique multiressources locale par prétraitement Organosolv et hydrolyse enzymatique.Thèse de doctorat Génie des procédés. Université Clermont Auvergne, Français. . Disponible sur.

<https://tel.archives-ouvertes.fr/>

Majidian.P et Chisti.Y,(2017).Metabolic engineering of microorganisms for biofuel production.Renewable and sustainable energy.vol 82.p.3863-3885.[en ligne].

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.085>

Malode S J a,*Keerthi Prabhu K a , Ronald J, Mascarenhas B , Nagaraj P. Shetti a,* et Tejraj M. Aminabhavi C.,(2021).Energy conversion and management. Recent advances and viability in biofuel production.ELSEVIER. .[en ligne].

www.sciencedirect.com/journal/energy-conversion-and-management-x

Manimegalai R, Gopinath L- R, Christy M, Divya D.,(2014). Isolation and identification of acetogenic and methanogenic bacteria from anoxic black sediments and their role in biogas production. International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences. [en ligne].

www.ijpaes.com.

Menia S, Nouicer I, Bakouri Y, M'raoui A, Tebibel H, Khellaf A., (2019). Production d'hydrogène par procédés biologiques. Oil & Gas Science and Technology - Revue d'IFP Energies nouvelles, Institut Français du Pétrole,74, pp.34. [en ligne].

<https://doi.org/10.2516/ogst/2018099>.

Motelay D, Murlin A., (2015). Les biocarburants : un enjeu d'avenir pour les besoins futurs de notre planète. XXXIes Olympiades Nationales de la Chimie 2015, Concours Parlons Chimie. [en ligne].

<https://docplayer.fr/14966704-Les-biocarburants-un-enjeu-d-avenir-pour-les-besoins-futurs-de-notre-planete-motelay-damien-murlin-alexis.html>

Motte J C., (2013). Digestion anaérobie par voie sèche de résidus lignocellulosiques: Etude dynamique des relations entre paramètres de procédés, caractéristiques du substrat et écosystème microbien. Thèse de doctorat. Sciences du Vivant [q-bio]. Université Montpellier 2 (Sciences et Techniques). Français. Disponible sur

<https://hal.inrae.fr/tel-02811065>

Mudhoo A, Forster-Carneiro T, Sánchez A., (2011). Biohydrogen production and bioprocess enhancement: A review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 31(3): 250–63. [en ligne].

DOI: 10.3109/07388551.2010.525497.

Nancib N., Sans date. Cours de Biochimie Microbienne L3. Université Ferhat Abbas Sétif1.

<https://fsnv.univsetif.dz/images/telecharger/MICRO/Biochimie%20Microbienne.pdf>.

Narwal S-K , Saun N-K, Dogra P, Chaihan G, Gupta R., (2015). Production and characterization of biodiesel using nonedible castor oil by immobilized lipase from *Bacillus aerius*. *Biomed Res.* [en ligne]

DOI: 10.1155/2015/281934.

Nguyen N-P T.,(2016). Metabolic Engineering of *Clostridium acetobutylicum* for the Production of Biofuels and Chemicals. Thèse de doctorat. Université de Toulouse. Disponible sur :

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02083693/document>.

Phukan M-M, Bora P, Gogoi K, Bolin K-K.,(2019). Biodiesel from *Saccharomyces cerevisiae*: fuel property analysis and comparative economics. *SN Applied Sciences*1. [en ligne].

DOI :/10.1007/s42452-019-0159-3.

Phuong N ,Nguyen T., (2016). Metabolic Engineering of *Clostridium acetobutylicum* for the Production of Biofuels and Chemicals. Thèse de doctorat. Ingénieries microbienne et enzymatique. Toulouse. Université de Toulouse. Disponible sur

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02083693/document>

Qui M, Shen W, Yan X, He Q, Cai D, Chen S, Wei H, Knoshaug E P, Zhang M, Himmel M-E, Yang S.,(2020). Metabolic engineering of *Zymomonas mobilis* for anaerobic isobutanol production. *Biotechnology for Biofuels*. [en ligne].

<https://doi.org/10.1186/s13068-020-1654-x>.

Rismani-Yazdi H.,(2008). Bioconversion of cellulose into electrical energy in microbial fuel cells. Thèse de doctorat en de Philosophie dans le Diplômé École : de l'Université d'État de l'Ohio. Disponible sur

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008PhDT.....71R/>

Ribeiro Leite R S,Nathaskia S, Pereira N,Ansilago M, Oliveira N N.,(2021).Biofuel production. ResearchGate[en ligne].

DOI:10.1016/B978-0-12-821218-9.00006-2

Ricaud A, Lokhat I., (2012). Construire une maison à énergie positive. Maison magazine. [en ligne].

<https://www.amazon.fr/Construire-une-maison-%C3%A9nergie-positive/dp/2100578057>

Robak* K, Balcerek M., (2018). Review of Second Generation Bioethanol Production from Residual Biomass, Food Technol. Biotechnol. 56 (2) 174-187. [en ligne].

DOI: 10.17113/ftb.56.02.18.5428.

Sadi M.,(2012).Recherche et Developpement , Le bioéthanol : une véritable alternative pour une énergie propre N°25 2012[en ligne]

https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_025_03.pdf

Shanmugam K T, Lorraine P, Yomano, Sean W, York L O, Ingram.,(2020). Advanced Fermentation Technologies: Conversion of Biomass to Ethanol by Organisms Other than Yeasts, a Case for Escherichia coli. Green Energy to Sustainability: Strategies for Global Industries, First Edition.[en ligne].

<https://www.researchgate.net/scientific-contributions/K-T-Shanmugam-55501013>

Sharma A, Shadiya, Sharma T, Kumar R, Meena K, Kanwar S S., (2019). Biodiesel and the Potential Role of Microbial Lipases in Its Production. Microbial Technology for the Welfare of Society.ResearchGate.P83-99. [en ligne].

DOI:10.1007/978-981-13-8844-6_4.

Singh V , Singh N , Singh M P , Mishra D., (2020). An Introduction of Metagenomics and Its Application in Microbial Fuel Production. In: Srivastava N., Srivastava M., Mishra P.K., Gupta V.K. (eds) Microbial Strategies for Techno-economic Biofuel Production. Clean Energy Production Technologies. Springer, Singapore. [en ligne].

https://doi.org/10.1007/978-981-15-7190-9_10

- Skulberg, O. M. (1995). Biophotolysis, hydrogen production and algal culture technology. In Hydrogen Energy System Springer, Dordrecht. (pp. 95-110).
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-0111-0_8
- Sourie J C, Treguer D, Rozakis S., (2005). L'ambivalence des filières biocarburants. INRA Sciences Sociales, P.8.[en ligne].
DOI:./10.22004/ag.econ.134702.
- Sparling R, Islam R, Cicek N, Carere C, Chow H, Carere C, Levin D B., (2006). Formate synthesis by Clostridium thermocellum during anaerobic fermentation. Canadian journal of microbiology, 52(7), 681-688. [en ligne].
DOI: 10.1139/w06-021.
- Stolarski M J, Rybczynska B, Krzyzaniak M, Lajszner W, Graban L, Peni D, Bordiean A., (2019). Thermophysical properties and elemental composition of agricultural and forest solid biofuels versus fossil fuels. Journal of Elementology, 24(4). [en ligne].
DOI: 10.5601/jelem.2019.24.1.1819.
- Tiangang L.,(2010). Genetic Engineering of Escherichia coli for Biofuel Production. ResearchGate. [en ligne].
DOI: 10.1146/annurev-genet-102209-163440 .
- Tiedje J, Donohue T.,(2008). Microbes in the Energy Grid. SCIENCE. Vol 320, Issue 5879.p. 9. [en ligne].
DOI: 10.1126/science.1159999).
- Ubaidillah N.Z, Audrey L, Corrado, R.,(2021). Public Perception of Biofuel Usage in Sarawak. ResearchGate. [en ligne].
<https://www.researchgate.net/publication/351927707>
- U.S. DOE.,(2015). Lignocellulosic Biomass for Advanced Biofuels and Bioproducts: Workshop Report, DOE/SC-0170. U.S. Department of Energy Office of Science. [en ligne].
<http://genomicscience.energy.gov/biofuels/lignocellulose/>.
- Walker G M.,(2014) Bioethanol: science and technology of fuel alcohol.[en ligne].
<https://bookboon.com/fr/bioethanol-science-and-technology-of-fuel-alcohol-ebook>

Wang X, Hoefel C P, Saint P T, Monis , Jin B.,(2007). The isolation and microbial community analysis of hydrogen producing bacteria from activated sludge. *Journal of Applied Microbiology*. [en ligne].

DOI:10.1111/j.1365-2672.2007.03370.x.

Weimer A, Kohlstedt M, Daniel C, Volke, Pablo I, Nickel , Wittmann K.,(2020). Industrial biotechnology of *Pseudomonas putida*: advances and prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology* volume.vol(104),p7745–7766.[en ligne].

DOI: 10.1007/s00253-020-10811-9.

Xing D, Ren N, Bruce E. Rittmann.,(2008). Genetic diversity of Hydrogen-Producing Bacteria in an Acidophilic Ethanol-H₂-Coproducting System, Analyzed Using the [Fe]-Hydrogenase Gene. *Applied and Environmental Microbiology* Vol (74), Issue 4, P 1232-1239. [en ligne].
<https://doi.org/10.1128/AEM.01946-07>.

Yang S, Fei Q, Zhang Y, Contreras L ,Utturkar S, Brown S, Himmel M , Zhang M.,(2016). *Zymomonas mobilis* as a model system for production of biofuels and biochemical. *Microbial Biotechnology*. [en ligne].

DOI: 10.1111/1751-7915.12408

Yang J, Ji Son H, Kim H, Cho S, Na J, Yeon Y, Lee J.,(2018). Mevalonate production from ethanol by direct conversion through acetyl-CoA using recombinant *Pseudomonas putida*, a novel biocatalyst for terpenoid production. *Microb Cell Fact*. [en ligne].

DOI :<https://doi.org/10.1186/s12934-019-1213-y>.

Yu J, Takahashi P.,(2007). Biophotolysis-based Hydrogen Production by Cyanobacteria and Green Microalgae. *Communicating Current Research and Educational Topics and Trends in Applied Microbiology*. [en ligne].

<https://www.researchgate.net/publication/242768941>.

Zakaria B S, Dhar B R., (2021). Characterization and significance of extracellular polymeric substances, reactive oxygen species, and extracellular electron transfer in methanogenic biocathode. *Scientific reports*. Disponible sur

<https://www.nature.com/articles/s41598-021-87118-w>

Zhang G, Yun J , Akter S.,(2019). Recent advances in biological pretreatment of microalgae and lignocellulosic biomass for biofuel production. *ResearchGate*. [en ligne].DOI:

10.1016/j.rser.2019.01.04

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Ecologie et environnement

Spécialité : Ecologie microbienne

Revue bibliographique sur les biocarburants microbiennes

Résumé

Le biocarburant est une énergie durable issue de matière organique d'origine animale ou végétale. Il est considéré comme une énergie renouvelable produite en transformant la biomasse, qu'elle soit sous forme de céréales et de cultures agricoles comme le maïs, ou sous forme d'huiles comme l'huile de soja et l'huile de palme. Le bioéthanol et le biodiesel sont les produits majoritaires obtenus par des méthodes physicochimiques ou biochimiques impliquant plusieurs types microbiens, entre autres les levures et les bactéries. Le type de biomasse utilisé a évolué au fil du temps, entraînant la création de différentes générations de biocarburants de la première génération produite à partir de plantes comestibles à la deuxième issue de plantes non comestibles et de déchets agricoles puis la troisième génération extraite d'algues microscopiques et en fin la quatrième génération faisant intervenir les techniques de génie génétique dans la modification des microorganismes producteurs ou celle de la biomasse même. L'utilisation de biocarburants comme source d'énergie présente certes un impact positif sur l'environnement car elle réduit les émissions de gaz à effet de serre, ce qui en a fait le centre d'intérêts et de soutien de nombreux pays pour servir de solution au problème d'approvisionnement énergétique, dans divers secteurs comme les transports et la production d'énergie électrique et thermique. Mais ceci ne peut pas nier les inconvénients de cette production particulièrement les investissements nécessaires à leur développement et à leur rentabilité. L'objectif de cette recherche est de jeter la lumière sur le sujet des biocarburants, leur types, leurs caractéristiques, la contribution des bactéries dans leur production et est ce qu'ils constituent réellement une alternative aux énergies fossiles ou pas.

Mot clés : biocarburant, énergie, biomasse, Microorganisme, Modification génétique.

Membre du jury :

Président du jury :	Mr CHABBI Rabeh	(MAA- UFM Constantine1).
Rapporteur :	Mme GUERGOURI Ibtissem	(MAA- UFM Constantine1).
Examineurs :	Mme GACI Meriem	(MCB- UFM Constantin

Présenté par :

CHAOUCHE Boutheina
HAMPLAOUI Kenza

Année universitaire : 2020-2021