

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة الإخوة منتوري قسنطينة I
Frères Mentouri Constantine I University
Université Frères Mentouri Constantine I

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Microbiologie

كلية علوم الطبيعة والحياة
قسم الميكروبيولوجيا

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

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie
Filière : Sciences Biologiques
Spécialité : Mycologie et Biotechnologie Fongique

N° d'ordre :
N° de série :

Intitulé :

**Production du bioéthanol à partir de biomasse lignocellulosique
par la levure *Saccharomyces cerevisiae*.**

Présenté par : DJEBA Chaima
LATRECHE Djoumana
OUARET Naila

Le : 23/06/2022

Jury d'évaluation :

Encadreur : LABBANI Fatima-Zohra Kenza (MCA, ENS de Constantine)
Examineur 1 : LEGHLIMI Hind (MCA, Université Frères Mentouri, Constantine 1)
Examineur 2 : DAFFRI Amel (MCA, Université Frères Mentouri, Constantine 1)

**Année universitaire
2021 - 2022**

Remerciements

*On remercie dieu le tout puissant de nous
avoir donné la santé et la volonté
d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi
riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans
l'aide et l'encadrement de l'enseignante
Dr. LABBANI Fatima Zohra Kenza,
M.C.B à l'ENSC, on le remercie pour la
qualité de son encadrement exceptionnel,
pour sa patience, sa rigueur et sa
disponibilité durant notre préparation de
ce mémoire.*

*Nos remerciements s'adresse également à
tout nos professeurs pour leurs générosités
et la grande patience dont ils ont su faire
preuve malgré leurs charges académiques
et professionnelles.*



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit, ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles

A mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager et me donner la certitude de finir mon travail et toujours avancer vers l'avenir

Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mes très chers frères et sœurs, Pour leurs disponibilités, leurs soutiens, leurs encouragements incessants, que dieu les protège et leurs donne une vie pleine de réussite et de bonheur.

A mes très chers neveux et nièces, je vous aime et vous aurez toujours une très grande place dans mon cœur

A tous mes amis, et tous ceux qui ont participé de près et de loin à la réalisation de ce travail

Je vous dis Merci !

Djoumana



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs Asma et Aya pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral,

A mon cher frère Waïl pour son appui et son encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

A mes chers amis Djoumana et Rania qui m'ont soutenu dans les moments difficiles

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.

Chaima



Dédicace

Tout d'abord, louange au bon Dieu qui nous a offert la chance et la force de poursuivre nos études.

Je dédie ce modeste travail, fruit de notre parcours universitaire :

*A mon père **Mahfoud** et ma mère **Yassmina** pour leur amour inestimable, leurs sacrifices, leur confiance, leur soutien et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer. Mes adorables soeurs & frères : **Roufeida, Sara, Haïtem et Moatasem Billah** et à tous mes neveux et nièces pour leur tendresse, leur complicité et leur présence, Aussi, je le dédie à mes amis les plus grandes sources de mon bonheur,*

Merci pour votre soutien.

Naila

Résumés

Résumé

L'objectif de ce travail est l'étude de la production de bioéthanol à partir de la biomasse végétale par les procédés biotechnologiques. Ceci fait appel au procédé de fermentation anaérobie en utilisant la souche de levure *S. cerevisiae*. De nos jours, *S. cerevisiae* occupe une place privilégiée dans les activités industrielles et elle est considérée comme usine cellulaire pour la production de molécules biosourcées d'intérêt industriel, telles que le bioéthanol. Le bioéthanol issu de la famille des énergies renouvelables, serait un bon substitut aux combustibles fossiles s'il pouvait être produit en fonction de données industrielles et économiques exigées par les populations et sociétés contemporaines. Il est obtenu par fermentation de matériaux agricoles riches en sucres généralement à partir de la biomasse lignocellulosique. Le principal atout que présente la biomasse lignocellulosique tient au fait qu'elle soit très abondante, renouvelable et moins coûteuse. En effet cette biomasse riche en sucres polymérisés de cellulose et hémicellulose peut fournir du bioéthanol après plusieurs étapes de prétraitement (physiques, chimiques, physico-chimiques et biologiques), d'hydrolyse chimique et enzymatique, de fermentation et d'extraction de l'éthanol pur. Cet éthanol d'origine végétale, est un carburant écologique, économique, plus rentable et moins cher que les carburants classiques. Ce qui en fait la solution idéale aux problèmes des énergies renouvelables. Il peut être employé de plusieurs façons dans plusieurs domaines, majoritairement le domaine de transport en addition à l'essence (carburant E85, E20 et E10) ou comme carburant unique dans les moteurs adaptés, dans les industries pharmaceutique, cosmétique, médicale, ainsi que dans la production de bioplastiques et autres.

Mots-clefs : *Saccharomyces cerevisiae*, bioéthanol, production, biomasse lignocellulosique, intérêt du bioéthanol.

Abstract

The objective of this work is the study of the production of bioethanol from plant biomass by biotechnological processes. This involves the process of anaerobic fermentation using the yeast strain *S. cerevisiae*. Nowadays, *S. cerevisiae* occupies a privileged place in industrial activities and it is considered as a cellular factory for the production of biosourced molecules of industrial interest, such as bioethanol. Bioethanol from the family of renewable energies would be a good substitute for fossil fuels if it could be produced according to the industrial and economic data required by contemporary populations and societies. It is obtained by fermentation of agricultural materials rich in sugars generally from lignocellulosic biomass. The main advantage of lignocellulosic biomass is that it is very abundant, renewable and less expensive. Indeed, this biomass rich in polymerized cellulose and hemicellulose sugars can provide bioethanol after several stages of pretreatment (physical, chemical, physico-chemical and biological), chemical and enzymatic hydrolysis, fermentation and extraction of ethanol pure. This plant-based ethanol is an ecological, economical, more profitable and less expensive fuel than conventional fuels. This makes it the ideal solution to the problems of renewable energy. It can be used in several ways in several fields, mainly in the field of transport, in addition to gasoline (fuel E85, E20 et E10) or as a sole fuel in adapted engines, in the pharmaceutical, cosmetic, medical, as well as bioplastics and other industries.

Key words: *Saccharomyces cerevisiae*, bioethanol, production, lignocellulosic biomass, interest of bioethanol.

الملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة إنتاج الإيثانول الحيوي انطلاقا من الكتلة الحيوية النباتية عن طريق عمليات بيوتكنولوجية الشيء الذي يدعو إلى المعالجة بالتخمير اللاهوائي باستعمال سلالة الخميرة التي تنتمي إلى النوع *S. cerevisiae*. في الوقت الحاضر تحوز خميرة *S. cerevisiae* على مكانة ممتازة في الأنشطة الصناعية وتعتبر مصنع خلوي لإنتاج جزيئات طبيعية المصدر ذات قيمة صناعية مثل الإيثانول الحيوي. ينحدر الإيثانول الحيوي من عائلة الطاقات المتجددة وسيكون بديلا جيدا للوقود الأحفوري إذا كان من الممكن أن يكون منتجا بطرق صناعية واقتصادية من طرف المجتمعات المعاصرة. يتم الحصول على الإيثانول الحيوي عن طريق تخمر مواد زراعية غنية بالسكريات، غالبا ما تكون من الكتلة الحيوية اللجنوسيليلوزية. تتميز الميزة الأساسية للكتلة الحيوية اللجنوسيليلوزية انها متوفرة بكثرة، ومتجددة وأقل تكلفة. هذه الكتلة الحيوية الغنية بمتعددات السكريد السليلوز والهيميسليلوز، بإمكانها توفير الإيثانول الحيوي بعد عدة مراحل من المعالجة الأولية (فيزيائية، كيميائية، فيزيوكيميائية وبيولوجية) التحليل الكيميائي والإنزيمي، التخمير واستخراج الإيثانول النقي. هذا الإيثانول الحيوي ذو المصدر النباتي يعتبر منتجا صديقا للبيئة من الناحية الإيكولوجية وأقل تكلفة وأكثر مردودية من الناحية الاقتصادية مقارنة بالوقود العادي ويعتبر الحل الأمثل لمشكلة الطاقات المتجددة. بالإمكان استعماله في عدة مجالات بالأخص النقل بإضافته إلى البنزين (وقود E85، E20 و E10)، أو كوقود وحيد في المحركات المضبوطة لهذا النوع من الوقود، في الصناعات الصيدلانية ومستحضرات التجميل، الطب، بالإضافة إلى صناعة البلاستيك وعدة مجالات أخرى.

الكلمات المفتاحية: *Saccharomyces cerevisiae*، الإيثانول الحيوي، عملية الإنتاج، الكتلة الحيوية اللجنوسيليلوزية، أهمية الإيثانول الحيوي.

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Chapitre I La levure *Saccharomyces cerevisiae*

1. Introduction	3
2. Définition	3
3. Classification	3
4. Morphologie et structure cellulaire	4
5. Caractéristiques biochimiques	5
6. Métabolisme	6
6.1. Métabolisme oxydatif	6
6.2. Métabolisme oxydo-réductif	6
6.3. Métabolisme fermentaire	7
7. Reproduction	7
7.1. Reproduction asexuée	8
7.2. Reproduction sexuée	9
8. Applications industrielles de <i>S. cerevisiae</i>	10
8.1. Domaine alimentaire	11
8.1.1. Fabrication de pâtes levées et de pain	11
8.1.2. Fabrication de boissons alcoolisées.....	12
8.2. Le domaine médical et pharmaceutique	13
8.3. Autres applications	14
8.4. Le domaine des énergies renouvelables et des biocarburants	15

Chapitre II Le bioéthanol

1. Biocarburants	17
1.1. Définition des biocarburants	17
1.2. Différents biocarburants	17

1.2.1. Biogaz.....	17
1.2.3. Le bioéthanol.....	18
2. Le bioéthanol.....	19
2.1. Définition du bioéthanol.....	19
2.2. Nomenclature de bioéthanol.....	19
2.3. Propriétés physico-chimiques du bioéthanol.....	19
2.3.1. Propriétés chimiques.....	19
2.3.2. Propriétés physiques.....	20
2.4. Générations du bioéthanol.....	21
2.4.1. Bioéthanol de première génération.....	21
2.4.2. Bioéthanol de deuxième génération.....	23
2.4.3. Bioéthanol de troisième génération.....	24
2.4.4. Bioéthanol de quatrième génération.....	25
2.5. Projets de production du bioéthanol.....	27
2.5.1. A l'échelle mondiale.....	27
2.5.2. A l'échelle continentale.....	28
2.5.3. A l'échelle nationale.....	30

Chapitre III Production du bioéthanol de deuxième génération

1. Biomasse lignocellulosique.....	32
1.1. Définition de la biomasse lignocellulosique.....	32
1.2. Ressources de la biomasse lignocellulosique.....	32
1.3. Composition de la biomasse lignocellulosique.....	33
1.3.1. Cellulose.....	34
1.3.2. Hémicellulose.....	36
1.3.3. Lignine.....	37
1.4. Prétraitement de la biomasse lignocellulosique.....	38
1.4.1. Procédés de prétraitement de la biomasse lignocellulosique.....	40
1.4.1.1. Prétraitement physique.....	40

1.4.1.2. Prétraitement physico-chimique	41
1.4.1.3. Prétraitement chimique	42
1.4.1.4. Prétraitement biologique.....	43
1.4.2. Avantages et inconvénients de prétraitement de la biomasse lignocellulosique.....	44
2. Hydrolyse.....	45
2.1. Hydrolyse chimique	46
2.2. Hydrolyse enzymatique	47
3. Fermentation alcoolique.....	49
3.1. Définition de la fermentation alcoolique	49
3.2. Les différents types de culture.....	49
3.2.1. Le mode discontinu ou <i>Batch</i>	49
3.2.2. Le mode semi-continu ou <i>Fed-batch</i>	50
3.2.3. Le mode continu	50
3.3. Procédé de la fermentation alcoolique	50
3.4. Paramètres de fermentation	52
4. Extraction du bioéthanol.....	52
4.1. Distillation classique	52
4.2. Distillation azéotropique	53
4.3. Distillation extractive.....	54
4.4. La séparation sur tamis moléculaire.....	55

Chapitre IV Intérêt du bioéthanol

1. Avantages et inconvénients du bioéthanol.....	59
2. Domaines d'utilisation du bioéthanol	60
2.1. Domaine de transport.....	61
2.2. Domaine chimique	62
2.3. Domaine pharmaceutique	62
2.4. Domaine alimentaire	63
2.4.1. Boissons alcoolisées	63
2.4.1.1. Bière.....	64

2.4.1.2. Vin	64
2.4.1.3. Spiritueux.....	64
2.4.2. Éthanol dans le vinaigre	64
2.5. Domaine cosmétique.....	65
2.6. Domaine médicale.....	66
2.7. Autres utilisations	66
Références bibliographiques.....	69

Liste des abréviations

CO₂ : Dioxyde de carbone

S. cerevisiae : *Saccharomyces cerevisiae*

µm : Micro-mètre

Mb : Million de bases

H₂O : Eau

% : Pourcentages

O₂ : Oxygène

G1 : première Génération

G2 : deuxième Génération

G3 : troisième Génération

G4 : quatrième Génération

pH : potentiel d'Hydrogène

BLC : Biomasse Ligno-Cellulosique

C° : Degré Celsius

ETBE: Ethyl-Tertio-Butyl-Ether

Kcal: Kilocalorie

mm: millimètre

MPa: Méga-Pascal

Kg : Kilogramme

SC-CO₂: Super-Critical Carbon dioxide

Psi: Pound force square inch

m³ : mètre cube

g/l : gramme par litre

MJ/kg : Méga-Joule par Kilogramme

nm : nanomètre

Liste des figures

Figure 01. Micrographie de <i>S. cerevisiae</i> (Bernstein & Bernstein, 2019).....	4
Figure 02. Structure cellulaire de la levure bourgeonnante <i>S. cerevisiae</i> (Pretorius, 2017). ...	5
Figure 03. Représentation schématique du cycle cellulaire de <i>S. cerevisiae</i> (Parisé, 2005)....	8
Figure 04. Schéma de la reproduction asexuée par bourgeonnement de la levure <i>S. cerevisiae</i> (Berber, 2017).....	9
Figure 05. Transition de la ploïdie au cours du cycle cellulaire de <i>S. cerevisiae</i> (Parisé, 2005).	9
Figure 06. Applications industrielles de <i>S. cerevisiae</i> (Walker & Pretorius, 2018).	10
Figure 07. Principales applications de <i>S. cerevisiae</i> dans l'industrie alimentaire (Net 02)....	11
Figure 08. Les différents types de levures produites (Amamria & Abed, 2018).....	12
Figure 09. Applications biomédicales de <i>S. cerevisiae</i> (Seyidoglu & Aydin, 2021).....	14
Figure 10. Production des biocarburants par <i>S. cerevisiae</i> à partir des ressources renouvelables (Choi et al., 2020).	16
Figure 11. Procédé de production de bioéthanol (Net 03).....	21
Figure 12. Production de bioéthanol à partir de la biomasse de première génération (Net 04).	22
Figure 13. Production de bioéthanol à partir de ressources lignocellulosiques (Chacón-Navarrete et al., 2021).....	24
Figure 14. Production de bioéthanol à partir de microalgues (Vaitilingom et al., 2021).	25
Figure 15. Représentation schématique des étapes impliquées dans la production du bioéthanol de quatrième génération (Kumar et al., 2020).....	26
Figure 16. Production d'éthanol carburant par pays (part de la production mondiale) en 2019 (Susmozas et al., 2020).	27
Figure 17. Principaux producteurs et consommateurs de bioéthanol dans le monde (Antoine et al., 2021).....	28
Figure 18. Production de bioéthanol en Afrique (2006) (Pasket, 2007).	29
Figure 19. Structure de la biomasse lignocellulosique (Abo et al., 2019).....	33
Figure 20. Composition de la biomasse lignocellulosique avec les constituants majeurs : cellulose, lignocellulose et lignine (Sudarsanam et al., 2018).....	33
Figure 21. Disposition des fibrilles et des microfibrilles de la cellulose dans la paroi cellulaire végétale (Sharma & Aggarwal, 2020).	34
Figure 22. Structure de la cellulose (Net 07).	35
Figure 23. Représentation schématique des liaisons hydrogène intramoléculaires (bleues) et intermoléculaires (rouges) des chaînes de cellulose (Rebiere, 2017).	35
Figure 24. Schéma des structures cristalline et amorphe de la cellulose (Zergane, 2021). ...	36
Figure 25. Principaux glucides composant les hémicelluloses (Ruiz, 2018).	37
Figure 26. Schéma d'une molécule de xylane (Sharma & Aggarwal, 2020).	37
Figure 27. Structures chimiques de la lignine (Sharma & Aggarwal, 2020).....	38
Figure 28. La biomasse lignocellulosique après prétraitement (Tayyab et al., 2018).....	39
Figure 29. Facteurs clés pour un prétraitement efficace de la biomasse lignocellulosique (Alio, 2020).....	40
Figure 30. Schéma du procédé d'hydrolyse (Eloutassi et al., 2014).	46
Figure 31. Présentation schématique de l'hydrolyse enzymatique de la biomasse lignocellulosique (Saldarriaga-Hernandez et al., 2020).....	48

Figure 32. Principe de la fermentation alcoolique du glucose par la levure <i>S. cerevisiae</i> (SC) (Fennouche, 2017).	51
Figure 33. Le processus de la distillation azéotropique pour la déshydratation de l'éthanol (Net 11).	54
Figure 34. Le processus de la distillation extractive pour la déshydratation de l'éthanol (Lee et al., 2021).	55
Figure 35. Principe de processus de la séparation sur tamis moléculaire (Net 12).	56
Figure 36. Schéma du principe du processus de la pervaporation (Manshad et al., 2016). ..	57
Figure 37. Les différents domaines d'utilisation du bioéthanol (Chilakamarry et al., 2021).	61
Figure 38. Les utilisations de bioéthanol dans le domaine pharmaceutique (Khayati, 2014).	63
Figure 39. Les utilisations de bioéthanol dans le domaine alimentaire (Alzeer & Abou Hadeed, 2016).	63
Figure 40. Les utilisations de bioéthanol dans le domaine cosmétique (Net 17 ; Net 19).	65

Liste des tableaux

Tableau 01. Caractéristiques biochimiques de <i>S. cerevisiae</i> (Flores & Gancedo, 2018 ; Guiraud & Galzy, 1998 ; LaRue & Spencer, 1967 ; Martin & Siebert, 1992 ; Saoud et al., 2017 ; Siverio, 2002).....	5
Tableau 02. Exemples de produits biopharmaceutiques de <i>S. cerevisiae</i> (Seyidoglu & Aydin, 2021).....	14
Tableau 03. Propriétés physiques de l'éthanol (Falcu et al., 2019 ; Mertens & Roiz, 2010).	20
Tableau 04. Différentes caractéristiques du bioéthanol de première génération (Jambo, 2016).	22
Tableau 05. Le bioéthanol de deuxième génération (Jambo, 2016).	24
Tableau 06. Le bioéthanol de troisième génération (Jambo, 2016).....	25
Tableau 07. Le bioéthanol de quatrième génération (Prabhu et al., 2022).....	26
Tableau 08. Les principaux pays producteurs de bioéthanol en Afrique (Wirnkör et al., 2020).	29
Tableau 09. Avantages de la production du bioéthanol à partir de la canne à sucre en Afrique (IRENA, 2016).	30
Tableau 10. Composition moyenne en cellulose, hémicelluloses et lignine de certains matériaux lignocellulosiques (Tayyab et al., 2018).....	34
Tableau 11. Exemples des procédés appliqués dans le prétraitement physico-chimique (Alio, 2020 ; Fong Lopez, 2019 ; Wertz, 2016).....	41
Tableau 12. Exemples des procédés appliqués dans le prétraitement chimique (Alio, 2020 ; Bichot et al., 2018 ; Fong Lopez, 2019).....	42
Tableau 13. Avantages et désavantages des prétraitements de la biomasse lignocellulosique utilisés (Fong Lopez, 2019).....	44
Tableau 14. Caractéristiques de l'hydrolyse à l'acide dilué et à l'acide concentré (Wertz, 2016).	47
Tableau 15. Principales différences entre l'hydrolyse enzymatique et chimique (Alio, 2020).	48
Tableau 16. Principaux avantages et désavantages de la distillation classique (Zentou et al., 2019).	53
Tableau 17. Avantages et inconvénients du bioéthanol (Net 13 ; Net 14 ; Net 15 ; Nichdemus, 2017 ; Riess, 2012).....	59

Introduction générale

Introduction générale

C'est un fait populaire que la dépendance mondiale aux combustibles fossiles a causé des effets défavorables, notamment une diminution des réserves de pétrole brut, une diminution de la qualité de l'air, des changements climatiques imprévisibles, etc. Dans le cadre de l'effort visant à promouvoir la durabilité et l'indépendance vis-à-vis des combustibles fossiles, le bioéthanol est désormais privilégié comme mélange ou substitut à l'essence fossile (**Aditiya et al., 2016**).

Cependant, les cultures conventionnelles telles que le maïs et la canne à sucre sont incapables de répondre à la demande mondiale de production de bioéthanol en raison de leur valeur primaire pour l'alimentation humaine et animale. Par conséquent, les substances lignocellulosiques telles que les déchets agricoles, déchets forestiers et déchets industriels qui sont des matières premières intéressantes pour la production de bioéthanol. La conversion du glucose ainsi que du xylose de la biomasse lignocellulosique en éthanol nécessite de nouvelles technologies, pour rendre l'ensemble du processus rentable (**Sarkar et al., 2012**).

Jusqu'à présent, la levure *Saccharomyces cerevisiae* est considérée comme le microorganisme idéal de la fermentation alcoolique (**Bakare & Benjamin, 2020**). L'utilité biotechnologique de *S. cerevisiae* réside dans ces caractéristiques biologiques uniques, c'est-à-dire sa capacité de fermentation, accompagnée de la production d'alcool et de CO₂. Ainsi, elle présente donc grande tolérance et productivité en éthanol. En outre, elle présente une capacité de croissance dans des milieux simples et peu coûteux, ainsi qu'une résistance aux conditions défavorables d'osmolarité et de pH bas (**Azhar et al., 2017 ; Parapouli et al., 2020**).

Le remplacement des combustibles fossiles par le bioéthanol a déjà été établi et son utilisation augmente dans le monde entier (**Niju, 2020**). La production de bioéthanol à partir de la biomasse végétale a attiré une attention considérable (**Khoshkho et al., 2022**). En raison de ses caractéristiques uniques par rapport aux autres carburants, l'utilisation du bioéthanol préserve l'environnement, aide au développement de l'économie rurale, et assure la sécurité des carburants. Il s'agit du biocarburant de transport renouvelable le plus répandu qui peut être produit à partir d'un large éventail de résidus agricoles (**Niju, 2020**). Les substrats utilisés pour produire du bioéthanol sont assez divers et le choix du substrat approprié dépend de différents facteurs, dont la composition en sucres, le coût et la rentabilité du processus (**Khoshkho et al., 2022**).

La biomasse lignocellulosique est la plus abondante source de carbone renouvelable sur terre pour la production de bioéthanol, et certainement une des moins coûteuses, qu'elle n'entre pas en compétition avec l'alimentation animale ou humaine (Alio, 2020 ; Saidi, 2011). Elle est présente sous diverses formes (résidus agricoles, déchets forestiers, etc.) et se compose principalement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine proportions différentes (Abo *et al.*, 2019). Sa conversion en bioéthanol à base de combustible devrait satisfaire une partie des besoins énergétiques, couverts jusqu'à présent essentiellement par les produits dérivés du pétrole, tout en générant de nouvelles opportunités pour le monde agricole (Saidi, 2011).

Tous ces avantages et privilèges ont suscité notre intérêt à étudier la production de bioéthanol par la levure *S. cerevisiae* à base de la biomasse lignocellulosique.

Ainsi, ce mémoire est composé de quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de la levure de boulanger *S. cerevisiae*.
- Le deuxième chapitre présente le bioéthanol.
- Le troisième chapitre illustre le processus de la production du bioéthanol de deuxième génération à partir de la biomasse lignocellulosique.
- Enfin, le quatrième chapitre est consacré aux différents intérêts du bioéthanol.

Chapitre I

La levure

Saccharomyces cerevisiae

1. Introduction

Le mot levure, selon (**Phaff et al., 1968**), provient du mot latin « *levare* » qui se traduit par lever. Ce mot a été appliqué aux levures en raison de l'aptitude de ces microorganismes à produire du dioxyde de carbone (CO₂) pendant la fermentation et à lever la surface mousseuse d'un milieu liquide de fermentation (**Oteng-Gyang, 1984**). Les levures peuvent être définies comme des eucaryotes microscopiques. Elles sont des hétérotrophes faisant partie du groupe des champignons dont les distingue par leur caractère unicellulaire et l'absence de vrai mycélium (au moins dans la plus grande partie de leur cycle biologique) (**Guiraud, 1998**). Qui se reproduisant de manière asexuée par bourgeonnement, ou fission et sexuée par formation des spores (**Joseph & Bachhawat, 2014**). Les levures sont des micro-organismes vraiment fascinants, tels que *Saccharomyces cerevisiae*. En raison de leurs activités diverses et dynamiques, elle a été utilisée pour la production de nombreux produits intéressants, tels que la bière, le vin, le pain, les biocarburants, et biopharmaceutiques (**Willaert, 2017**).

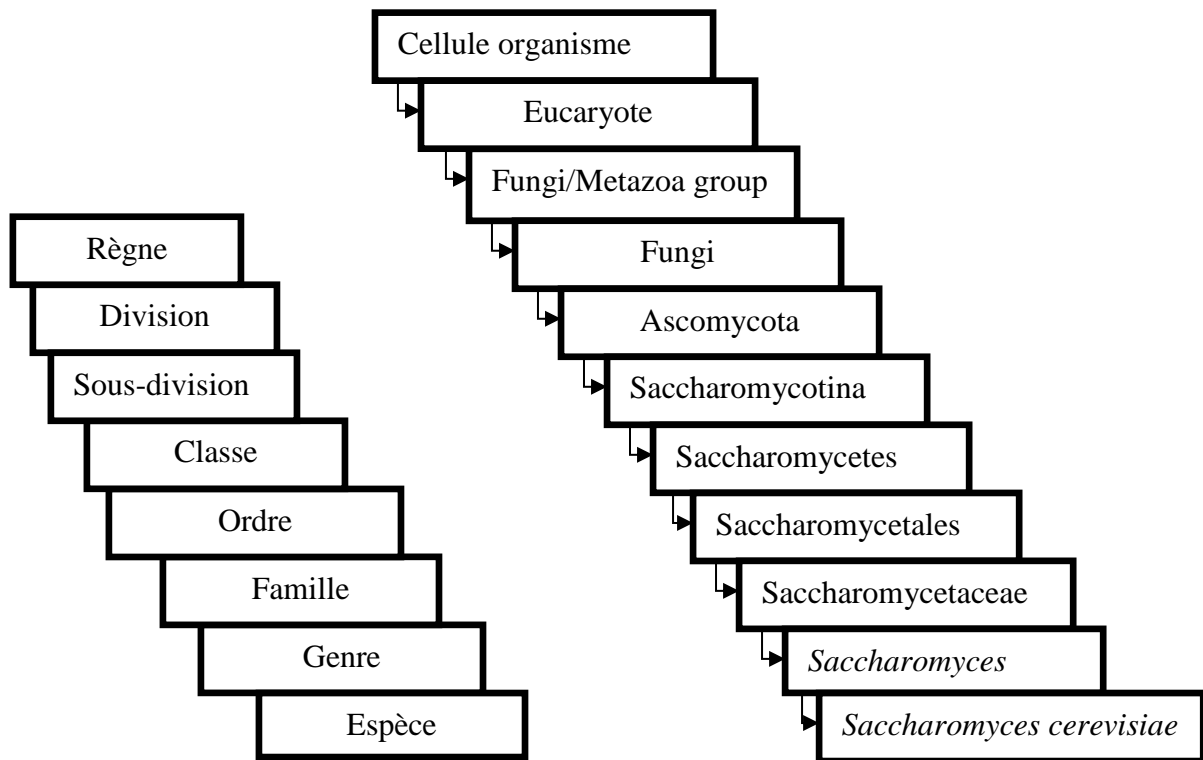
2. Définition

Saccharomyces vient du mot « saccharose » qui signifie sucre, « myces » qui signifie champignon. Tandis que *cerevisiae* fait référence à « cervoise », nom donné autrefois à la bière, c'est un terme scientifique utilisé pour désigner le petit champignon microscopique qui compose les différentes sortes de levures utilisées pour la fermentation (**Larpent & Gourgoud, 1985**). Elle est littéralement connue comme levure du sucre. *S. cerevisiae* est appelée aussi levure de bière ou de boulanger (**Walker & White, 2017**).

S. cerevisiae est l'eucaryote le mieux étudié et un outil précieux pour la plupart des aspects de la recherche fondamentale sur les organismes eucaryotes. Cela est dû à sa nature unicellulaire, qui souvent simplifie les choses, offrant la combinaison des faits que presque toutes les fonctions biologiques trouvées dans les eucaryotes sont également présentes et bien conservées chez *S. cerevisiae*. De plus, elle est également facilement adaptable à la manipulation génétique (**Parapouli et al., 2020**).

3. Classification

Selon **Nguyen (2016)**, la classification de la levure *S. cerevisiae* est la suivante :



4. Morphologie et structure cellulaire

La levure *S. cerevisiae* prend la forme d'une cellule sphérique, ovoïde, ou allongée de taille très variable (3- 4 μm et 4-14 μm). Certaines cellules sont cylindriques et de grandes tailles (jusqu'à 20 μm de longueur ou plus) (Figure 01) (Larpent, 1991).



Figure 01. Micrographie de *S. cerevisiae* (Bernstein & Bernstein, 2019).

En tant qu'eucaryote, ces cellules ont une structure cellulaire interne complexe. Une cellule typique de *S. cerevisiae* serait composée d'une enveloppe cellulaire constituée d'une

paroi cellulaire, d'un périplasma et une membrane plasmique qui entoure et enveloppe le cytoplasme. Le cytosquelette maintient l'organisation structurale des organites tels que le noyau, le réticulum endoplasmique, l'appareil de Golgi, les mitochondries, et les vacuoles. Le noyau d'une cellule de levure haploïde contient un génome relativement compact de 12 Mb (non redondant) à 14 Mb (total), séparé en 16 chromosomes linéaires portant 6000 gènes (Figure 02) (Pretorius, 2017).

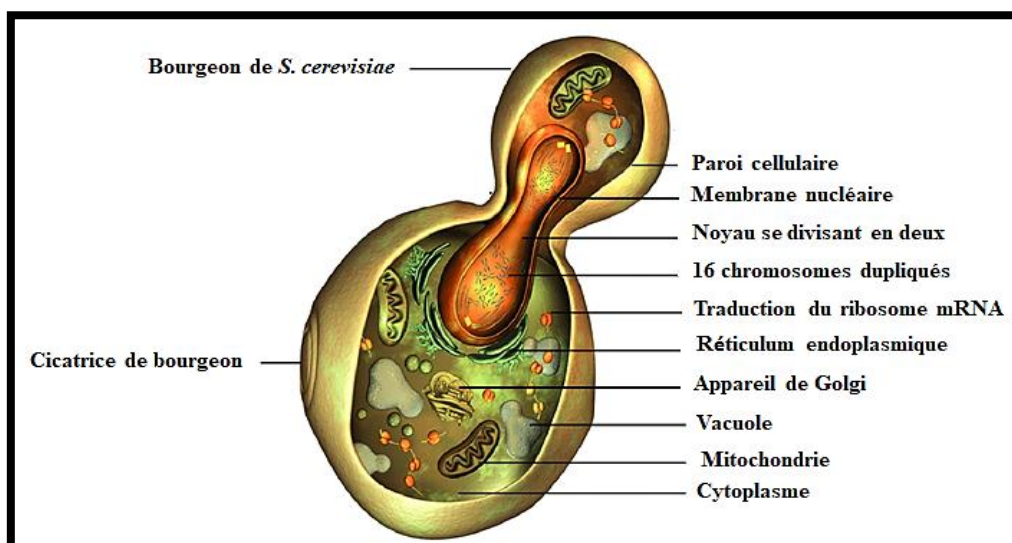


Figure 02. Structure cellulaire de la levure bourgeonnante *S. cerevisiae* (Pretorius, 2017).

5. Caractéristiques biochimiques

L'étude des caractéristiques biochimiques permettent de définir l'espèce de la levure à l'intérieur d'un genre. L'identification est basée essentiellement sur l'aptitude de la levure à fermenter les sucres en éthanol et en dioxyde de carbone (CO₂), et à assimiler des sources carbonés et azotés (Bacha, 2008).

Les caractéristiques biochimiques de la levure *S. cerevisiae* sont représentées dans le tableau (01).

Tableau 01. Caractéristiques biochimiques de *S. cerevisiae* (Flores & Gancedo, 2018 ; Guiraud & Galzy, 1998 ; LaRue & Spencer, 1967 ; Martin & Siebert, 1992 ; Saoud *et al.*, 2017 ; Siverio, 2002).

Fermentation		Sources de carbone		Source d'azote	
Glucose	+	Glucose	+	Nitrate	-
Galactose	+	Galactose	+	Nitrite	-
Saccharose	+	Saccharose	+	Créatinine	-
Maltose	+	Maltose	+	Créatine	-

Raffinose	+	Raffinose	+	L-lysine	-
Tréhalose	-	Tréhalose	-	Imidazole	-
Cellobiose	-	Cellobiose	-	Glucosamine	+
Melibiose	-	Melibiose	-	Cadavérine	-
Lactose	-	Lactose	-	Ethylamine	-
Xylose	-	Xylose	-		

(+) : positif ; (-) : négatif

6. Métabolisme

La levure *S. cerevisiae* présente une diversité métabolique dans la façon de production et de consommation de l'énergie à partir de substrats dégradés. Pour produire de la biomasse ou du bioéthanol, elle peut utiliser différents substrats carbonés, principalement des sucres, qui leur fournissent l'énergie nécessaire. Le glucose se distingue des autres sucres comme étant la source de carbone préférée de *S. cerevisiae*. En fonction des conditions d'oxygénation et de la nature et quantité de substrat carboné, on distingue trois types de métabolisme (Celton, 2011) : le métabolisme oxydatif, le métabolisme oxydo-réductif et le métabolisme fermentaire.

6.1. Métabolisme oxydatif

Ce type de métabolisme nécessite la présence d'oxygène et une concentration en substrat limitée afin d'éviter un changement métabolique chez certaines levures comme *S. cerevisiae*. Dans ces conditions, le glucose est oxydé complètement via les voies métaboliques de la glycolyse, du cycle de Krebs et de la phosphorylation oxydatif. Ce métabolisme qui conduit à la formation du dioxyde de carbone (CO₂) et d'eau (H₂O) est très énergétique et permet à la levure de se maintenir en vie, de synthétiser de la matière organique et de produire de la biomasse (X) avec un rendement cellulaire élevé (Rezki-Bekki, 2014). Le bilan énergétique théorique de cette voie métabolique est décrit par l'équation suivante (Rezki-Bekki, 2014) :



6.2. Métabolisme oxydo-réductif

Chez certaines espèces microbiennes comme *S. cerevisiae*, un excès de glucose en aérobiose fait basculer le métabolisme oxydatif vers un métabolisme oxydo-réductif,

condition communément appelée *effet Crabtree* (Chniti, 2015). *S. cerevisiae* étant très sensible au glucose, elle est définie alors comme une levure *Crabtree* positive. L'*effet Crabtree* correspond à la transition respiro-fermentaire en conditions aérobies se caractérise par (i) une diminution du rendement de la biomasse, (ii) la production de métabolites secondaires tels que l'éthanol, le glycérol et l'acétate, et (iii) une vitesse spécifique de consommation d'oxygène réduite (Celton, 2011).

6.3. Métabolisme fermentaire

En absence totale d'oxygène, *S.cerevisiae* présente un métabolisme fermentatif. Comme pour le métabolisme oxydatif, le glucose est dégradé par la voie de la glycolyse jusqu'au pyruvate. A ce niveau-là, le pyruvate n'est plus dirigé vers le cycle de Krebs mais il est converti en éthanol et CO₂ (Amillastre, 2012). En plus de ces composés majoritaires, des alcools, des aldehydes, des esters et des acides sont formés en petites quantités. Ce métabolisme est moins énergétique que le métabolisme oxydatif (Berber, 2017). Le bilan énergétique de cette transformation est décrit par l'équation comme suit (Rezki-Bekki, 2014) :

$$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \text{ (Glucose)} + 2 \text{ Pi} + 2 \text{ ADP} \rightarrow 2 \text{ C}_2\text{H}_6\text{O (Ethanol)} + 2 \text{ CO}_2 + \text{ATP (20 kcal)}.$$

7. Reproduction

Le cycle cellulaire de la levure *S. cerevisiae* comprend deux modes de reproduction (Figure 03). Le premier est la reproduction asexuée qui s'effectue principalement par bourgeonnement. C'est un processus par lequel une cellule mère donne naissance à une autre cellule fille essentiellement identique. Tandis que le second est la transition de la ploïdie par la reproduction sexuée. Lors de cette transition, les cellules haploïdes de sexe opposé se conjuguent pour former des cellules diploïdes. Les cellules diploïdes sporulent pour former des cellules haploïdes (Parisé, 2005).

Selon les conditions environnementales externes (quantité d'éléments nutritifs, température, etc.), les cellules haploïdes et diploïdes doivent faire un choix. Si les conditions sont favorables, elles poursuivent le cycle cellulaire mitotique, à ce niveau il s'agit de la reproduction asexuée. Par contre, si les conditions sont défavorables, les cellules haploïdes entrent alors en mode de conjugaison sexuelle. On parle donc de la reproduction sexuée. Les cellules diploïdes entrent en mode de sporulation (Parisé, 2005).

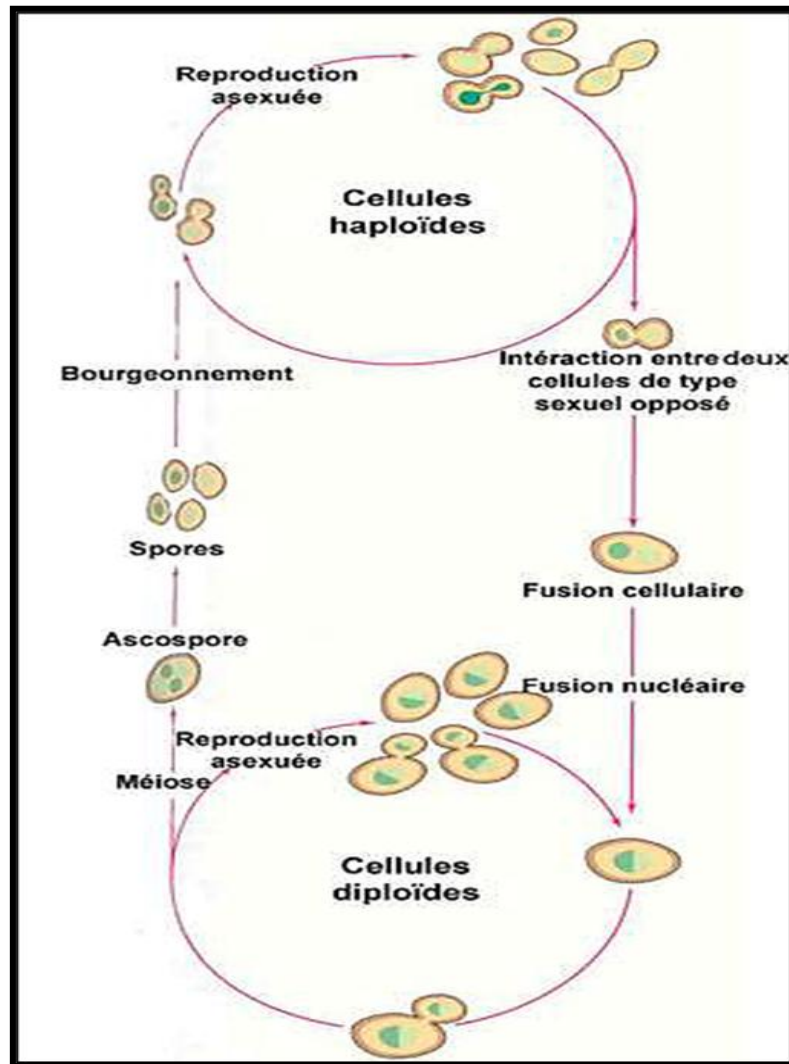


Figure 03. Représentation schématique du cycle cellulaire de *S. cerevisiae* (Parisé, 2005).

7.1. Reproduction asexuée

Chez *S. cerevisiae* ce mode de reproduction s'effectue par bourgeoisement. En présence d'une quantité suffisante de nutriments, les cellules de *S. cerevisiae* entrent en croissance végétative. Les cellules haploïdes et diploïdes se divisent par reproduction asexuée (Parisé, 2005). Le noyau de la cellule se déplace vers la paroi, s'étire et se divise en donnant naissance à un petit bourgeon à la surface de la cellule. Celui-ci croît rapidement pour donner naissance à une cellule fille, qui peut ou non se détacher de la cellule mère et bourgeonner à son tour (Figure 04) (Berber, 2017).

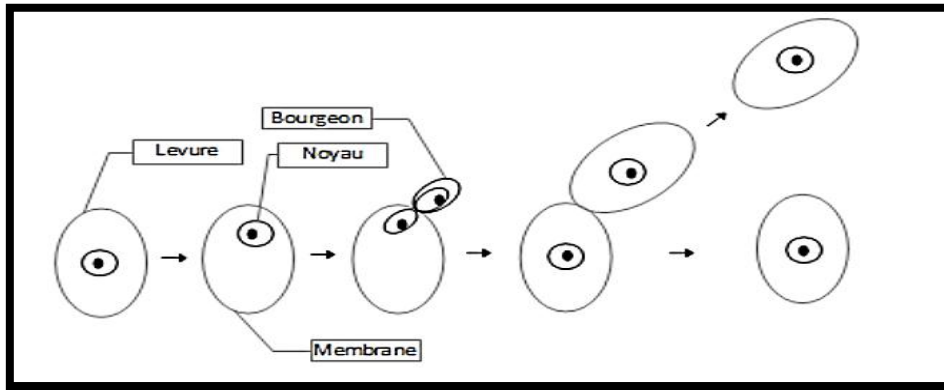


Figure 04. Schéma de la reproduction asexuée par bourgeonnement de la levure *S. cerevisiae* (Berber, 2017).

7.2. Reproduction sexuée

En absence d'une quantité suffisante de nutriments et en présence de phéromones sexuelles, les cellules haploïdes de *S. cerevisiae* abandonnent la reproduction asexuée et débutent la reproduction sexuée (Parisé, 2005). Deux cellules haploïdes de sexe opposé se fusionnent pour produire une cellule diploïde dans le processus de la conjugaison sexuelle. À l'inverse, au cours de la méiose (ou sporulation) cette cellule diploïde sporule pour produire quatre cellules haploïdes (ascospores) qui seront libérées ultérieurement pour former la prochaine génération gamétophytique (Figure 05). La fusion des noyaux et la méiose subséquente ont lieu à l'intérieure de l'asque. Les ascospores sont à l'état de vie ralentie, et ne reprendront leur vie active que lorsque les conditions de milieu seront favorables. Ils représentent le mode de survie durant la mauvaise saison (Berber, 2017).

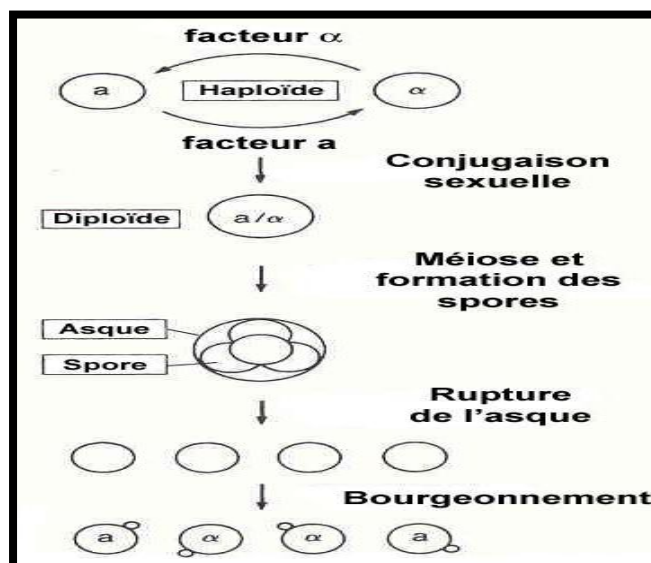


Figure 05. Transition de la ploïdie au cours du cycle cellulaire de *S.cerevisiae* (Parisé, 2005).

8. Applications industrielles de *S. cerevisiae*

Les levures ont une histoire riche et un bel avenir en biotechnologie. Leur implication et leur importance dans les fermentations industrielles sont inégalées par d'autres organismes d'importance biotechnologique. *S. cerevisiae* est la levure dominante dans le domaine industriel. Son utilisation dans les procédés biotechnologiques s'accélère en raison d'un certain nombre de propriétés et de développement. Sa physiologie unique et son caractère non pathogène pour les humains et les animaux devraient donc être davantage utilisées dans diverses disciplines et plusieurs domaines, tels que : le domaine alimentaire (production d'aliments fermentés), le domaine des énergies renouvelables et des biocarburants (bioéthanol), le domaine médical et pharmaceutique (production des vaccins, des protéines recombinantes, etc.) (Figure 06) (Johnson & Echavarri-Erasun, 2011).

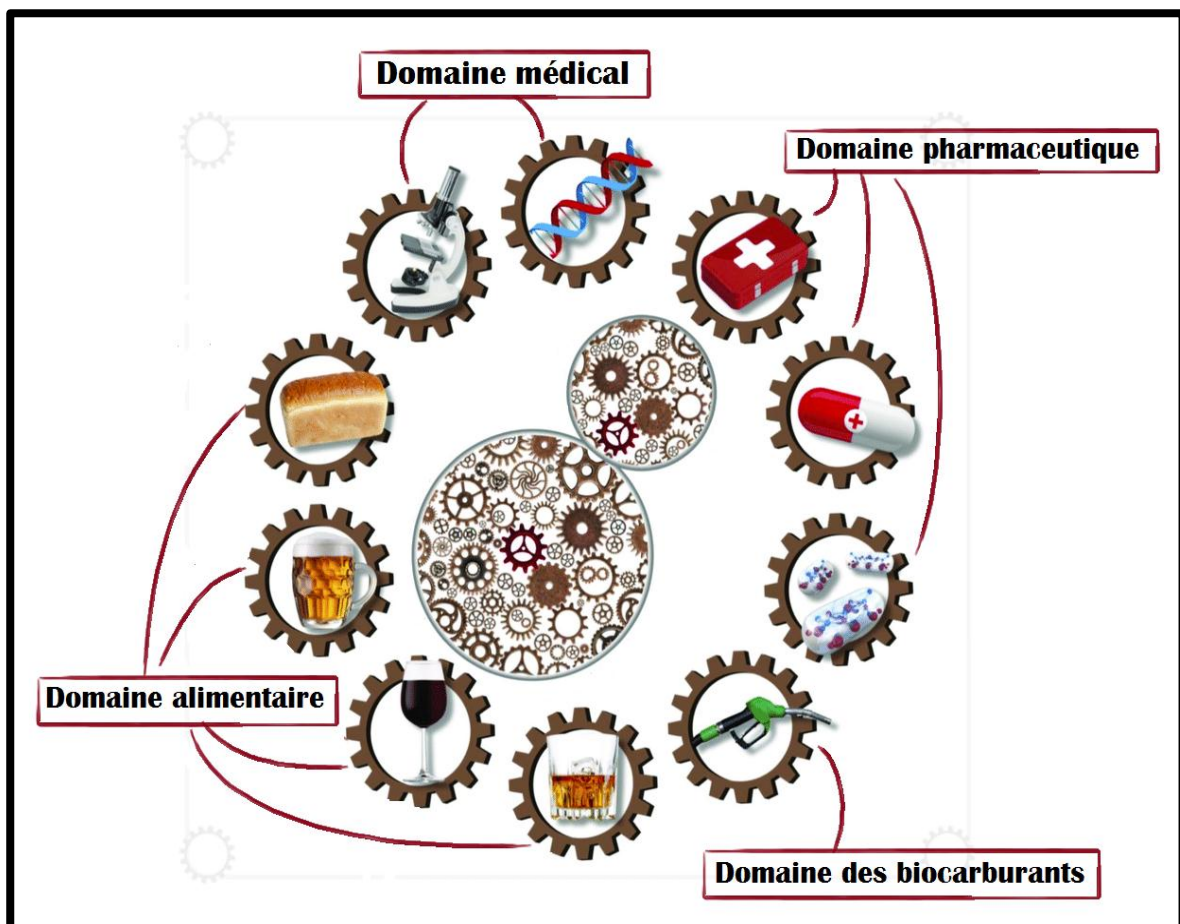


Figure 06. Applications industrielles de *S. cerevisiae* (Walker & Pretorius, 2018).

8.1. Domaine alimentaire

La levure *S. cerevisiae* ou « la levure de boulangerie » ou « la levure de bière », est aujourd'hui largement produite et utilisée dans l'industrie alimentaire, du fait de son métabolisme fermentaire, sa totale innocuité, sa multiplication rapide, et sa facilité de mise en oeuvre et ses bienfaits nutritionnels (Net 01). Elle joue un rôle très important comme un agent de fermentation et pour l'élaboration de produits dérivés (Amamria & Abed, 2018). Comme son nom l'indique, elle est utilisée principalement pour la fabrication du pain, et des boissons alcoolisées telles que la bière, le vin, et le cidre, en plus d'autres produits alimentaires comme le fromage, le chocolat et le café (Figure 07).

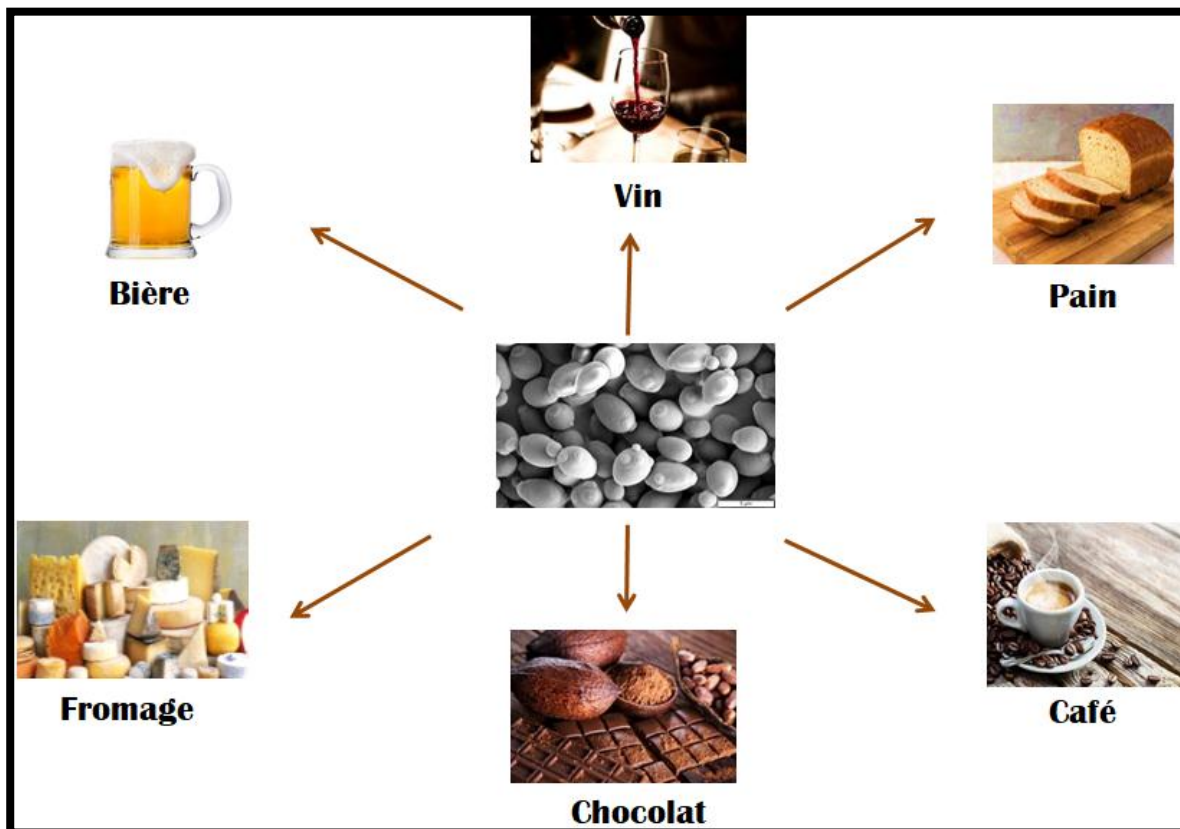


Figure 07. Principales applications de *S. cerevisiae* dans l'industrie alimentaire (Net 02).

8.1.1. Fabrication de pâtes levées et de pain

Les souches de *S. cerevisiae* sont des fermenteurs au rôle essentiel dans la fabrication du pain et d'autres produits de boulangerie, tels que les gâteaux, les biscuits, les muffins, et d'autres. Elles consomment partiellement le sucre des farines, et produisent non seulement du gaz carbonique et de l'éthanol, qui facilitent la prise de taille lors de la cuisson, mais génèrent également plus de 200 molécules, qui composent les arômes recherchés des produits de boulangerie. La quantité de molécules aromatiques produites varie en fonction des paramètres

de fabrication, mais aussi du métabolisme spécifique de la souche de levure utilisée (**Net 01**). C'est un point important à considérer pour réaliser des avantages concurrentiels. Dans le domaine des levures et de la fermentation, l'industrie dont le leader mondial est l'entreprise *Lesaffre*, offre sur le marché une large gamme de levures pour les boulangers : levure pressée, levure émietlée, levure liquide, levure sèche active, levure sèche instantanée, levure à humidité intermédiaire surgelée (Figure 08). En revanche, des procédés complexes doivent être parfaitement maîtrisés pour produire ces types de levure. De solides connaissances sur le comportement des levures, par exemple la compréhension de la résistance des levures pendant la déshydratation pour la production des levures sèches actives, sont requises (**Amamria & Abed, 2018**).

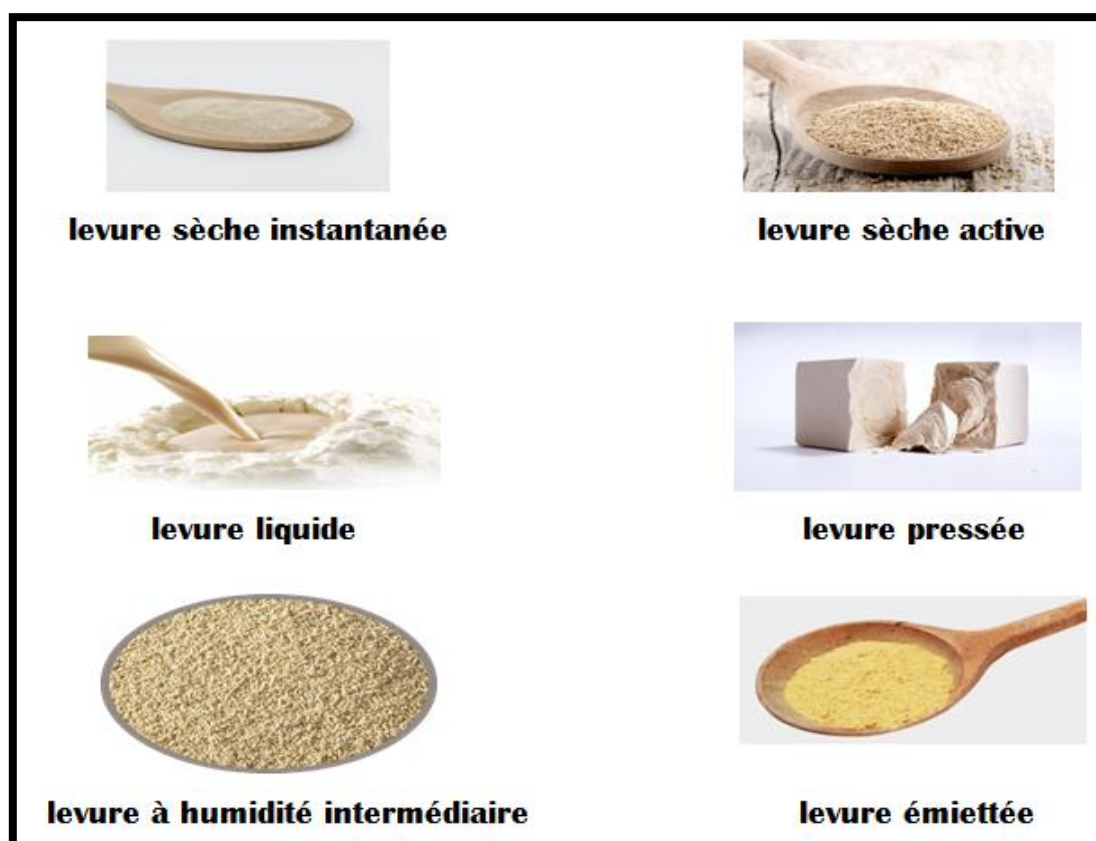


Figure 08. Les différents types de levures produites (**Amamria & Abed, 2018**).

8.1.2. Fabrication de boissons alcoolisées

La capacité de *S. cerevisiae* à fermenter les sucres et à les transformer en alcool (éthanol) et en CO₂ en a fait un ingrédient clé dans les industries des boissons alcoolisées. *S. cerevisiae* peut convertir les sucres (glucose, fructose et saccharose) présents dans les fruits et les céréales en alcool éthylique et en CO₂ par fermentation alcoolique. Les féculents comme l'orge, le blé, le riz, la canne à sucre et le maïs peuvent servir de matières premières pour la

production d'alcool dans la bière (**Net 02**). Autres boissons alcoolisées, le vin est produit à partir de la fermentation du raisin par la levure de vinification. Au Japon *S. cerevisiae* est également utilisée, pour produire le saké qui est une boisson fermentée à base de riz. Le même protocole que pour la fermentation du vin est appliqué pour la fabrication du cidre à partir de pommes ou du poiré à partir de poires. Les alcools "forts" comme le Rhum est issu de la fermentation de cannes à sucre, ou encore la Vodka est issue de la fermentation de pommes de terre, de seigle ou de betteraves à sucre (**Amamria & Abed, 2018**).

8.2. Le domaine médical et pharmaceutique

S. cerevisiae a été décrite comme l'organisme le plus domestiqué de l'humanité et l'espèce de levure encore largement exploitée dans l'industrie. Les applications modernes des levures en particulier *S. cerevisiae* ont été largement étendues au-delà des applications classiques (**Turker, 2014**). Elle est aujourd'hui de plus en plus utilisée dans le domaine biomédical en raison de son structure cellulaire, de son composant et de sa croissance rapide (Figure 09).

Concernant l'industrie pharmaceutique, *S. cerevisiae*, comme un organisme eucaryote unicellulaire, a les propriétés des bactéries et des humains. Comme les bactéries, elle peut se répliquer rapidement et comme tout autre organisme eucaryote, elle peut produire des protéines sous forme correctement repliée. Ces propriétés uniques en font un ingrédient clé dans les industries pharmaceutiques (**Net 02**). Des dizaines de protéines pharmaceutiques, des vaccins, et des facteurs sanguins, produites par *S. cerevisiae*, ont été commercialisés (**Seyidoglu & Aydin, 2021**).

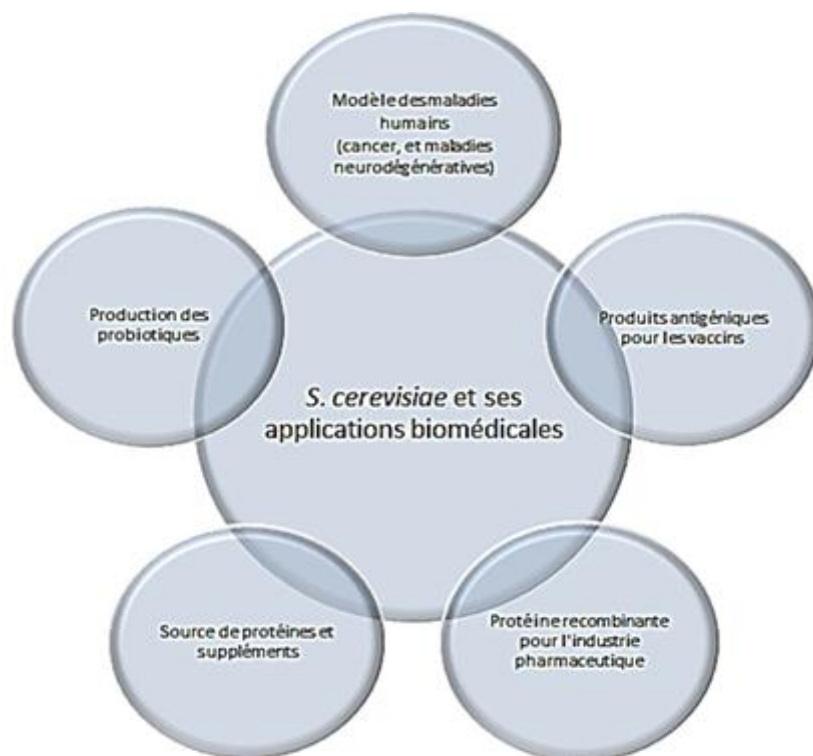


Figure 09. Applications biomédicales de *S. cerevisiae* (Seyidoglu & Aydin, 2021).

Le tableau (02) représente quelques exemples des produits biopharmaceutiques de la levure *S. cerevisiae*.

Tableau 02. Exemples de produits biopharmaceutiques de *S. cerevisiae* (Seyidoglu & Aydin, 2021).

Produits biopharmaceutiques	Catégorie
Albumine sérique humaine	Facteur sanguin
Protéines recombinantes	Protéine
Insuline	Hormone
Glucagon	Hormone
Hormone parathyroïdienne humaine	Hormone
Protéine purifiée pour vaccins	Protéine
Virus comme des particules	Protéine
Systèmes d'expression génique	Gène

8.3. Autres applications

Comme on le sait, les propriétés particulières de *S. cerevisiae* en font la levure dominante dans la biotechnologie moderne, ses utilisations sont élargies au fil du temps. Elle est aujourd'hui de plus en plus utilisée dans les applications environnementales telles que la bioremédiation et l'élimination des métaux lourds des eaux usées. Elle est également utilisée

en agriculture comme agent de lutte biologique. Plusieurs produits chimiques peuvent être produits en utilisant la levure comme biocatalyseur. De nouveaux développements dans la levure d'ingénierie ont introduit de nouvelles capacités pour étendre la gamme de substrats et produire de nouveaux produits jusqu'à présent que la levure ne peut pas produire (**Turker, 2014**). Ses utilisations pour l'homme sont infinies, *S.cerevisiae* est une excellente source de nombreux nutriments comme le chrome, le potassium, le zinc, la vitamine B1 (thiamine), la vitamine B6 (pyridoxine), et la vitamine B2 (riboflavine). Elle contient les neuf acides aminés essentiels dont notre corps a besoin. Elle a été utilisée commercialement dans les aquariums pour fournir du CO₂ aux plantes aquatiques (**Net 02**).

8.4. Le domaine des énergies renouvelables et des biocarburants

La demande énergétique mondiale actuelle repose sur les combustibles fossiles, qui disparaîtront dans les décennies à venir (**Bakare & Benjamin, 2020**). Les énergies renouvelables, en particulier le bioéthanol, est un biocarburant attrayant ayant un potentiel de sécurité environnementale, et considéré comme une solution au problème énergétique actuel. A ce jour, de nombreuses ressources de biomasse ont été étudiées pour la production de bioéthanol tels que la mélasse, le substrat à base d'amidon, l'extrait de canne de sorgho sucré, la lignocellulose et d'autres déchets (Figure 10) (**Zabed et al., 2017**). De nombreux facteurs affectent le processus de production d'éthanol principalement la nature de la matière première (sa composition biochimique) et le microorganisme utilisé. *S. cerevisiae* est la levure la plus courante pour la production de bioéthanol par fermentation d'une large gamme de sucres en éthanol. Elle est utilisée dans les installations industrielles en raison de ses propriétés intéressantes en terme de rendement, tolérance et productivité en éthanol, de croissance dans des milieux simples et peu coûteux, et bouillon de fermentation non dilué résistant aux inhibiteurs et retardant la croissance des contaminants (**Azhar et al., 2017**).

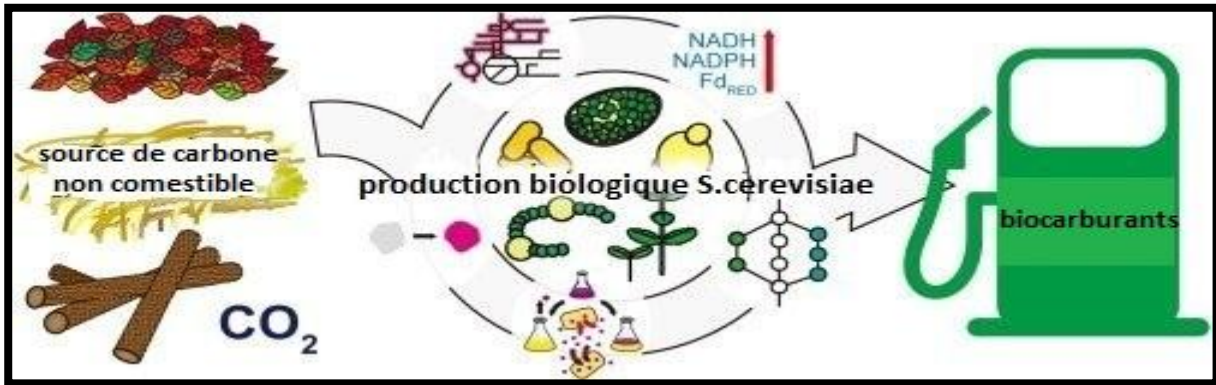


Figure 10. Production des biocarburants par *S. cerevisiae* à partir des ressources renouvelables (Choi *et al.*, 2020).

Chapitre II

Le bioéthanol

1. Biocarburants

1.1. Définition des biocarburants

L'expression « biocarburant » (du grec *bio* : vie, vivant et du latin *carbo* : charbon, carbone) signifie que ce carburant est obtenu à partir de matériaux organiques. On emploie également les expressions « carburant vert » et « agro carburants » (**Berna, 2009**).

Le biocarburant est un carburant produit par des processus biochimiques à partir d'une matière première végétale et/ou animale. Ce carburant comprend à la fois des formes liquides comme le bioéthanol (équivalent essence ou équivalent diesel) et des formes gazeuses comme le biogaz (par exemple le méthane) ou l'hydrogène. Le biocarburant est utilisé comme substitut aux combustibles fossiles ou il est mélangé avec des combustibles fossiles (**Akbar et al., 2019**).

Les biocarburants représentent une source d'énergie renouvelable, sans grand danger pour l'environnement et constituent ainsi une voie de développement soutenable et durable. En effet, ils contribuent à réduire les émissions de gaz à effet de serre et de ce fait, à améliorer la qualité de l'air. De plus, ils peuvent remplacer les carburants fossiles et assurer une certaine stabilité économique en réduisant la dépendance énergétique (**Bendriss, 2021 ; Khiari, 2016**).

1.2. Différents biocarburants

Le terme biocarburant est générique, il inclut le bioéthanol, le biodiesel et le biogaz (**Khiari, 2016**).

1.2.1. Biogaz

Les biogaz sont des produits gazeux obtenus à partir de la biomasse par différents procédés ; ils sont produits par fermentation (digestion microbienne en l'absence d'oxygène) de la matière organique. Il en résulte principalement la production du méthane (molécule combustible et constituant principal du gaz naturel), du monoxyde de carbone et de l'hydrogène. Les biogaz peuvent être obtenus soit par méthanisation des déchets organiques, soit par gazéification (craquage thermique) du bois (**Khiari, 2016**).

Le biogaz est un mélange de divers gaz comme le méthane (60%), dioxyde de carbone (40%) et une trace de monoxyde de carbone, d'azote, d'hydrogène et de sulfure d'hydrogène. Le biogaz peut être utilisé pour la production d'électricité, en production combinée de chaleur et d'électricité (CHP : *Combined heat and power*), dans les moteurs à gaz, les piles à

combustible, dans les véhicules à moteurs sous forme de gaz naturel comprimé (GNC). Sur le plan énergétique, le biogaz a un pouvoir calorifique considérable par rapport aux autres combustibles. Par exemple, le pouvoir calorifique du biogaz est d'environ 60% du gaz naturel et quadratique du propane. Ainsi, l'utilisation du biogaz comme énergie renouvelable est importante et plus d'efforts sur l'industrialisation du biogaz sont nécessaires (**Hajilary *et al.*, 2019**).

1.2.2. Le biodiesel (Biogazole)

Le biodiesel fait l'objet d'une attention internationale en raison de ses propriétés de carburant et de sa compatibilité. Il a de meilleures propriétés que celles du pétrodiesel, comme une biodégradabilité renouvelable et supérieure à celle des combustibles fossiles, un pouvoir lubrifiant non toxique et excellent et essentiellement exempt de soufre et d'aromatiques. Le carburant biodiesel a le potentiel de réduire le niveau de polluants et de cancérigènes probables. C'est un carburant respectueux de l'environnement qui peut être utilisé dans n'importe quel moteur diesel sans qu'il soit nécessaire de repenser la technologie actuelle (**Keera *et al.*, 2018**).

Bien que de nombreuses sources de lipides aient été étudiées pour la production de biodiesel tels que les huiles à base de graisses végétales et animales, mais les huiles microbiennes produites par plusieurs micro-organismes oléagineux, notamment les bactéries, les champignons, les levures et les microalgues se sont également avérées des matières premières potentielles (**Mathew *et al.*, 2021**).

1.2.3. Le bioéthanol

De nos jours, le bioéthanol est l'un des biocarburants liquides le plus utilisé au monde, jouant un rôle essentiel dans le développement industriel. Il est produit à partir des déchets agricoles, déchets de fruits, déchets municipaux et industriels en utilisant des levures du genre *Saccharomyces* (**Khoshkho *et al.*, 2022 ; Vaitilingom, 2021**).

L'éthanol produit par cette fermentation est combustible et peut être ajouté aux carburants conventionnels. Les alcools peuvent être utilisés comme additifs pour les carburants et dans d'autres cas, ils sont utilisés comme matière première pour la fabrication d'autres carburants ; dans des moteurs conçus pour cette utilisation. Le taux d'éthanol peut aller jusqu'à 85%, mais un taux plus faible de 5 à 10% est même actuellement ajouté aux carburants des voitures et ce, sans aucune modification nécessaire des moteurs (**Khiari, 2016**).

2. Le bioéthanol

2.1. Définition du bioéthanol

Le bioéthanol est le biocarburant liquide le plus utilisé au monde. L'éthanol est également connu sous le nom d'alcool éthylique. Sa formule moléculaire est $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ (Alio, 2021).

Le bioéthanol est de l'éthanol produit par fermentation microbienne alcoolique, utilisé des cultures vivrières comme matières premières (par exemple, le blé, le maïs, les pommes de terre, les betteraves, la canne à sucre), car ces matériaux sont des sources supérieures d'amidon et de sucre facilement accessibles nécessaires à la fermentation (Chabenne, 2012). Il y a trois défis majeurs que les chercheurs doivent relever dans la production de bioéthanol. Premièrement, assurer la disponibilité à grande échelle de matières premières cellulosiques chaque fois que nécessaire. Deuxièmement, la conversion de la cellulose en éthanol de manière rentable afin de la rendre plus compétitif par rapport à la fécule de maïs et à l'éthanol à base d'essence. Troisièmement, modifier le véhicule infrastructure pour utiliser des carburants renouvelables tels que le carburant cellulosique mandaté par le Renewable Norme de carburant (Periyasamy, 2018).

2.2. Nomenclature de bioéthanol

- Nom codifié : E100 (Beana *et al.*, 2021).
- Nom systématique : éthanol
- Nom recommandé : bioéthanol
- Synonymes : éthanol (96 %) ; éthyle alcool ; hydroxyde d'éthyle ; alcool de grain ; méthyle Carbinol (Shitole *et al.*, 2022).
- Nom chimique : Éthanol (Shitole *et al.*, 2022).

2.3. Propriétés physico-chimiques du bioéthanol

2.3.1. Propriétés chimiques

Dans les conditions normales, l'éthanol est un produit stable. Il possède les propriétés générales des alcools primaires (réactions d'oxydation, déshydrogénation, déshydratation et estérification). Il peut réagir vivement avec les oxydants puissants : acide nitrique, acide perchlorique, perchlorates, peroxydes, permanganates, trioxyde de chrome, etc. La réaction

avec les métaux alcalins conduit à la formation d'éthylate et à un dégagement d'hydrogène ; elle peut être brutale sauf si elle est réalisée en l'absence d'air pour éviter la formation de mélanges explosifs air-hydrogène. Le magnésium et l'aluminium peuvent également former des éthylate, la plupart des autres métaux usuels étant insensibles à l'éthanol (Falcý *et al.*, 2019).

2.3.2. Propriétés physiques

L'éthanol est un liquide mobile, incolore, volatil, d'odeur plutôt agréable, décelable dès 84ppm. L'éthanol est miscible à l'eau, le mélange se faisant avec dégagement de chaleur et contraction du liquide il est également miscible à la plupart des solvants usuels. C'est un bon solvant dès le titre d'un mélange eau/éthanol est le rapport entre le volume d'alcool absolu contenu dans ce mélange et le volume de celui-ci à 15°C ; il est exprimé en pourcentage (%) en volume, L'éthanol peut être commercialisé sous forme anhydre (éthanol à 100 % en volume appelé aussi alcool absolu) ou à différentes concentrations dans l'eau, principalement à 95% et pour des usages antiseptiques à 70% (Falcý *et al.*, 2019).

Le tableau (03) représente les différentes propriétés physiques de l'éthanol.

Tableau 03. Propriétés physiques de l'éthanol (Falcý *et al.*, 2019 ; Mertens & Roiz, 2010).

Propriétés physiques de l'éthanol	
Masse molaire	46.0684 ± 0.0023 g/mol
N° CAS	64-17-5
Etat physique	Liquide
Point de fusion	-114° C
Point d'ébullition	78°C
Pouvoir calorifique inférieur (MJ/L)	21.06
Pouvoir calorifique inférieur (MJ/kg)	26.7
Densité (kg/L)	0.789
Nombre de Cétane	<100
Nombre d'Octane	0.40-0.45
Type de moteur	A combustion (Essence)
Pression de vapeur	5.9 kPa à 20°C 10 kPa à 30°C 29.3 kPa à 50°C
Densité gaz / vapeur	1.59

Indice d'évaporation	8.3 (oxyde de diéthyle = 1) 2.4 (acétate de n-butyle = 1)
Point d'éclair	13 °C (éthanol pur) ; 17 °C (éthanol à 95 % vol.) ; 21 °C (éthanol à 70 % vol.) ; 49 °C (Éthanol à 10 % vol.) ; 62 °C (éthanol à 5 % vol.) (tous en coupelle fermée)
Température d'auto-inflammation	363 à 425 °C (selon les sources)
Limites d'explosivité ou d'inflammabilité (en volume % dans l'air)	Limite inférieure : 3.3 % limite supérieure : 19 à 27.7 % (selon les sources)
Coefficient de partage n-octanol / eau (log Pow)	- 0.31

2.4. Générations du bioéthanol

Par rapport aux énergies fossiles, la production de bioéthanol à base de biomasse est plus durable et largement distribuées (Figure 11). Le bioéthanol peut être produit à partir de tous les groupes de matières premières ; par conséquent, l'éthanol obtenu à partir du groupe respectif peut être nommé d'après cette génération, c'est-à-dire le bioéthanol à base de 1G ,2G, 3G et 4G (Kumar *et al.*, 2020).

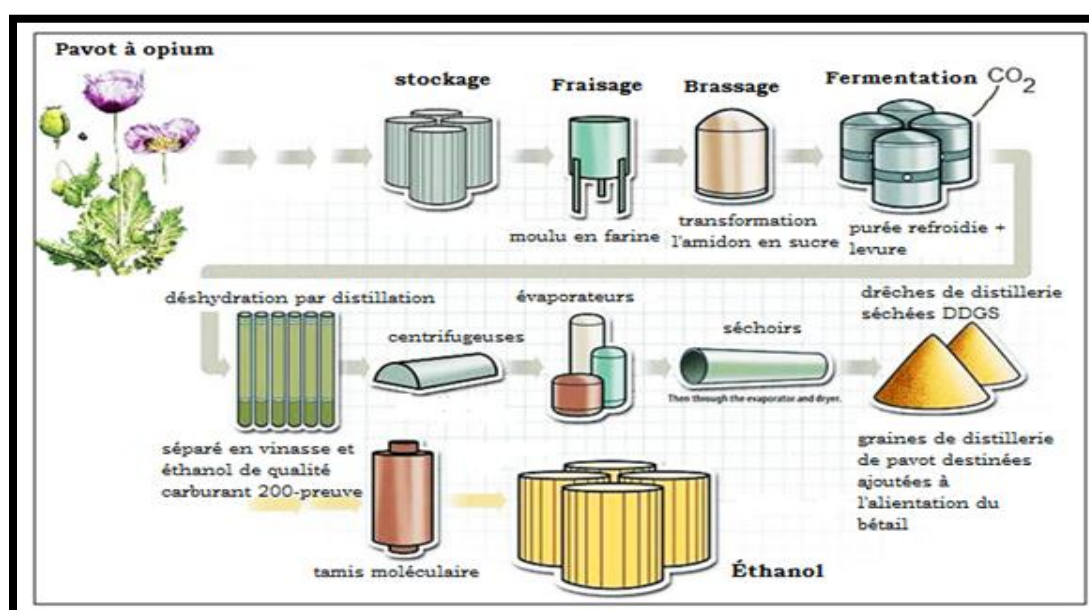


Figure 11. Procédé de production de bioéthanol (Net 03).

2.4.1. Bioéthanol de première génération

Le bioéthanol de première génération est produit directement à partir des jus libres de sucre de certaines cultures, en convertissant les sucres (saccharose, monosaccharides comme le glucose) par fermentation alcoolique grâce à des micro-organismes en bioéthanol. Une

variété de matières premières telles que les cultures contenant du saccharose (par exemple la canne à sucre ou la betterave à sucre) et les céréales féculentes (par exemple le blé, le maïs et l'orge) sont les bonnes sources de substances riches en sucres pour la production de bioéthanol de première génération (Figure 12) (Alio, 2021).

Cependant, le principal inconvénient de la première génération bioéthanol est la menace d'une limitation de l'approvisionnement alimentaire qui peut affecter la population mondiale humaine car les matières premières et ces dérivées provenant de sources alimentaires. Des millions de personnes dans le monde souffrent actuellement de la faim ainsi que de la malnutrition et de plus, l'utilisation des ressources alimentaires pour le carburant peut entraîner une augmentation des prix des denrées alimentaires ont précisé que d'abord bioéthanol de génération est économiquement déraisonnable, puisque les teneurs en carbone des plantes sont principalement perdues au cours du processus de conversion (Jambo, 2016).

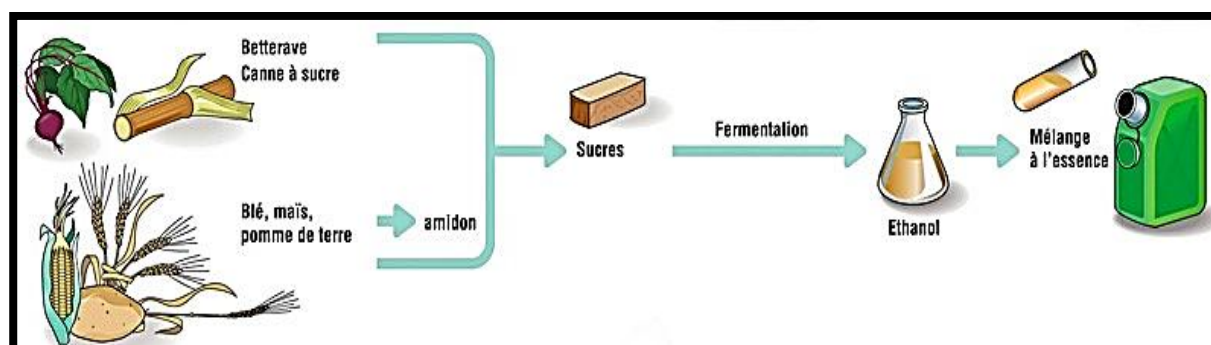


Figure 12. Production de bioéthanol à partir de la biomasse de première génération (Net 04).

Le tableau (04) représente les différentes caractéristiques du bioéthanol de première génération.

Tableau 04. Différentes caractéristiques du bioéthanol de première génération (Jambo, 2016).

Bioéthanol de première génération	
Source de matières primaire	Culture comestible (canne à sucre, maïs, betterave)
Technologie de conversion	Extraction de sucre fermentation et distillation
Rendement en bioéthanol	Faible
Impact sur l'environnement	Faible apport à l'atténuation de CO ₂

2.4.2. Bioéthanol de deuxième génération

Le terme « bioéthanol de deuxième génération » est apparu comme une aubaine pour surmonter la querelle « nourriture contre carburant », à laquelle était confrontée la première génération bioéthanol. Le bioéthanol de deuxième génération aussi appelé les « biocarburants avancés », est produit par des procédés innovants principalement utilisant des matières premières lignocellulosiques et des résidus forestiers agricoles (Figure 13) (**Jambo, 2016**).

Le terme "lignocellulosique" couvre une gamme de molécules végétales/biomasse contenant de la cellulose, avec des quantités variables de lignine, ainsi qu'une longueur de chaîne et un degré de polymérisation différents. La biomasse lignocellulosique semble être une matière première intéressante pour trois raisons principales. Premièrement, elle constitue une ressource renouvelable de manière durable dans le futur. Deuxièmement, elle semble avoir d'excellentes propriétés environnementales puisque sa transformation ne génère pas de rejets importants de dioxyde de carbone ou de soufre. Troisièmement, elle pourrait avoir un potentiel économique important à condition que les prix des combustibles fossiles augmentent (**Alio, 2021**).

Les avantages de ces matières premières sont la facilité de disponibilité qui n'entre pas en concurrence avec la nourriture et a donc finalement un impact bien moindre sur l'environnement. D'autre part le bioéthanol de deuxième génération a connu l'obstacle dû à certains problèmes technologiques, il s'agit du coût élevé et du rendement moyen du bioéthanol en raison de sa composition de lignine. D'autres problèmes principaux liés à la production de bioéthanol de deuxième génération sont l'exigence de technologies et d'installation de pointe (**Jambo, 2016**).

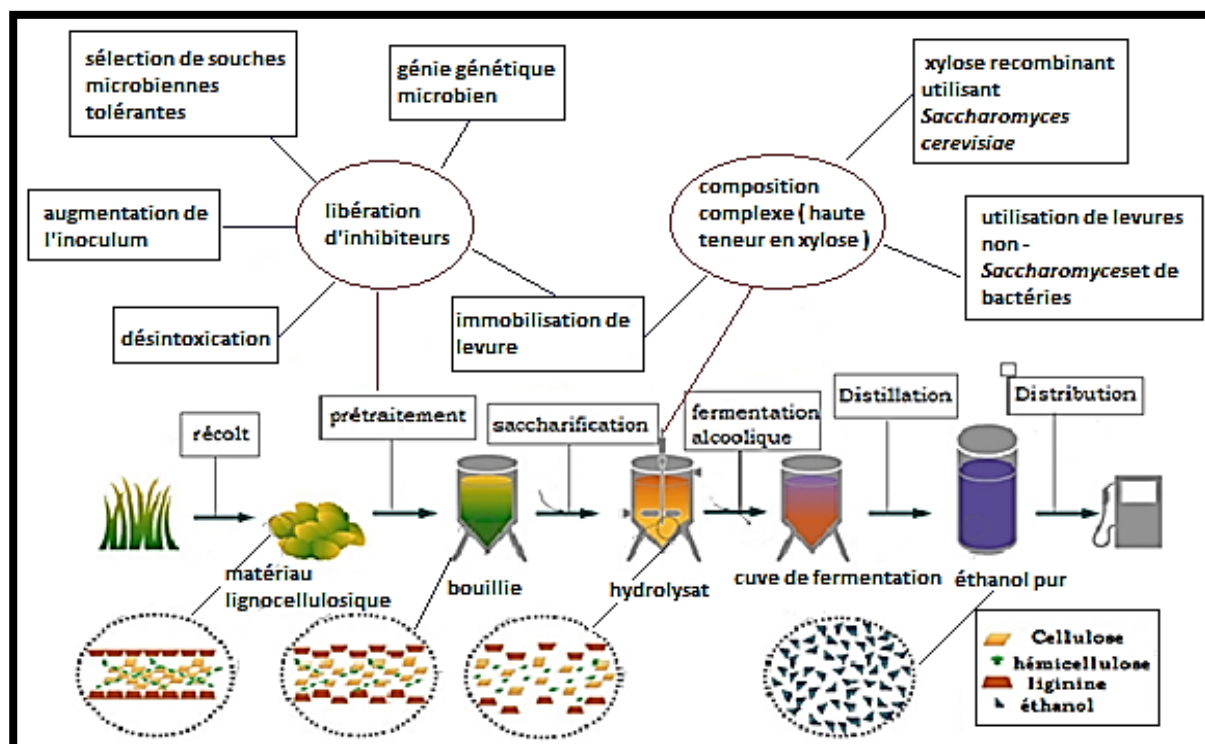


Figure 13. Production de bioéthanol à partir de ressources lignocellulosiques (Chacón-Navarrete *et al.*, 2021).

Le tableau (05) résume les différentes caractéristiques du bioéthanol de deuxième génération.

Tableau 05. Le bioéthanol de deuxième génération (Jambo, 2016).

Bioéthanol de deuxième génération	
Source de matières premières	Culture non comestible (résidus agricoles et forestiers)
Technologie de conversion	Prétraitement, hydrolyse, fermentation et distillation
Rendement en bioéthanol	Moyen
Impact sur l'environnement	Contribution élevée à l'atténuation de CO ₂

2.4.3. Bioéthanol de troisième génération

Le bioéthanol de troisième génération produit à partir de la biomasse de microalgues peut représenter un carburant respectueux de l'environnement (Lakatos, 2019).

Employant les algues comme matière première de bioéthanol peuvent être avantageuses, car les algues peuvent rapidement absorber le dioxyde de carbone, accumuler de fortes concentrations de lipides et de glucides, être facilement cultivées, et nécessitent moins de terrain que les plantes terrestres (Figure 14) (Tse *et al.*, 2021).

La culture des microalgues à l'échelle industrielle n'a pas besoin de terres arables. Les systèmes de production les plus couramment utilisés pour la culture des microalgues se fait en

bassins extérieurs ouverts et fermés photobioréacteurs (PBR), car il s'agit de systèmes artificiels de production extensive qui peuvent être dans une certaine mesure optimisés en ce qui concerne les conditions de croissance des souches de production sélectionnées (Lakatos, 2019).

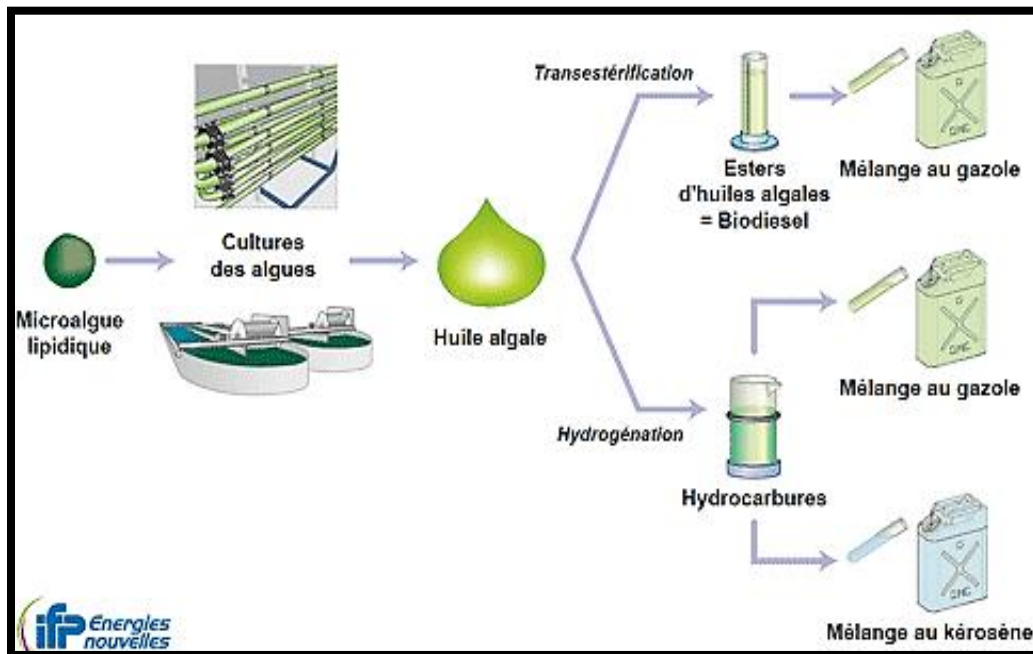


Figure 14. Production de bioéthanol à partir de microalgues (Vaitilingom *et al.*, 2021).

Le tableau (06) résume les différentes caractéristiques du bioéthanol de deuxième génération.

Tableau 06. Le bioéthanol de troisième génération (Jambo, 2016).

Bioéthanol de Troisième génération	
Source de matières primaires	Biomasse algale
Technologie de conversion	Distillation et fermentation
Rendement en bioéthanol	Elevé
Impact sur l'environnement	Contribution élevée à l'atténuation de CO ₂

2.4.4. Bioéthanol de quatrième génération

Les matières premières de quatrième génération sont les bio-huiles, les microbes génétiquement modifiés (levures) et les plantes avec une grande efficacité de captage et de séquestration du carbone (Figure 15). Ces matières premières sont conçues pour capturer plus de CO₂ pendant la croissance de la matière première (Kumar *et al.*, 2020). Bien que les méthodes de quatrième génération varient énormément, certaines méthodes de production de bioéthanol de quatrième génération captent les émissions de CO₂, processus de production

utilisant l'oxycombustion (un processus dans lequel les combustibles fossiles sont brûlés avec un mélange gazeux enrichi en oxygène à la place de l'air), Cela produit des mélanges de gaz de combustion composé principalement de CO₂ et de H₂O. Cette méthode offre la possibilité de capturer le CO₂ directement par compression physique et refroidissement (par exemple, procédés de distillation) (Tse *et al.*, 2021).

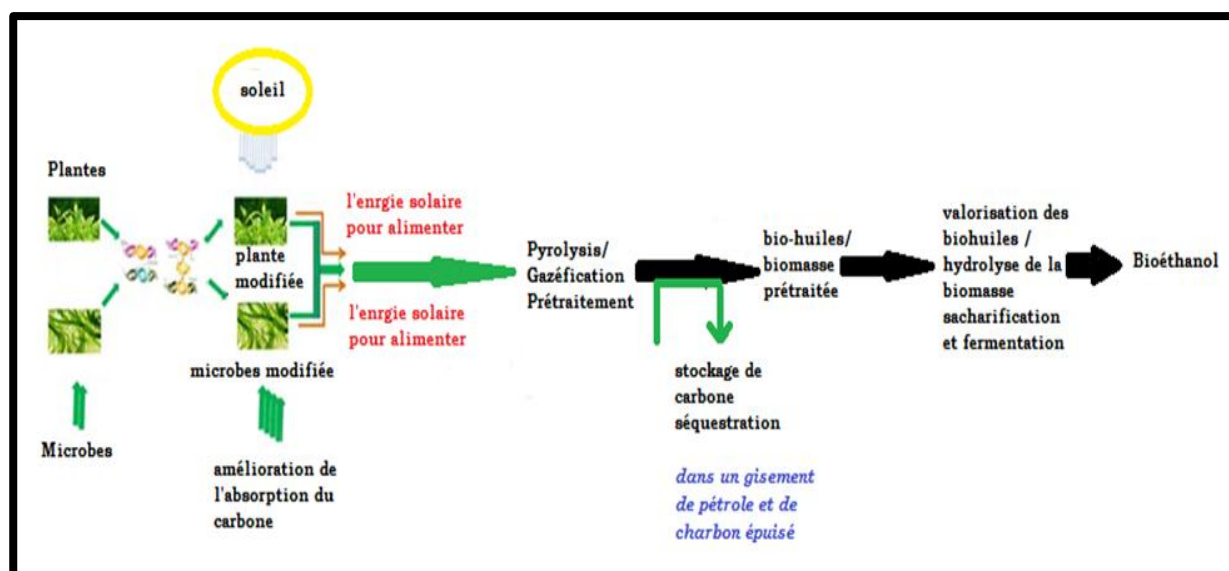


Figure 15. Représentation schématique des étapes impliquées dans la production du bioéthanol de quatrième génération (Kumar *et al.*, 2020).

Par ailleurs, cette génération se repose sur des avantages et des inconvénients, tels que la technologie intensive associée à la modification génétique des plantes et des microbes, les limites technologiques et éthiques, préoccupation associée aux microbes synthétiquement synthétisés et à la séquestration du carbone et les techniques de captage en sont à leurs stades préliminaires et minimisent donc l'application de cette matière première (Kumar *et al.*, 2020). Le tableau (07) résume les différentes caractéristiques du bioéthanol de deuxième génération.

Tableau 07. Le bioéthanol de quatrième génération (Prabhu *et al.*, 2022).

Bioéthanol de quatrième génération	
Source de matières premières	Plantes et microbes génétiquement modifiés (algues, microalgues, levures)
Technologie de conversion	l'oxycombustion, l'électro-fermentation
Rendement en bioéthanol	Elevé
Impact sur l'environnement	Contribution élevée à l'atténuation de CO ₂

2.5. Projets de production du bioéthanol

2.5.1. A l'échelle mondiale

À l'heure actuelle, l'une des alternatives les plus prometteuses pour la convection l'essence est le bioéthanol, le plus grand biocarburant liquide produit au monde. Comme un carburant de transport, il peut être utilisé soit sous forme mélangée avec de l'essence, soit sous forme d'éthanol pur. Avec une production mondiale dépassant les 100 milliards litres en 2016, comme indiqué dans l'association des carburants renouvelables, l'éthanol devrait rester le biocarburant le plus important et le plus rentable. Le bioéthanol est considéré comme le premier biocarburant au monde et son marché est continuellement croissance. Le remplacement des carburants fossiles par le bioéthanol a été déjà établi et son utilisation est en augmentation au Brésil (canne à sucre) et aux États-Unis (maïs). Les États-Unis et le Brésil sont ensemble les principaux producteurs mondiaux d'éthanol (Niju *et al.*, 2020).

Les principaux acteurs du marché du bioéthanol (en 2019) sont représentés sur la figure (16). Les États-Unis sont en tête, avec une part de 54% de la production mondiale totale. Le Brésil est le deuxième producteur mondial d'éthanol avec une quantité totale de 32 000 millions de litres en 2019 (environ 30% de la production mondiale). Une grande partie de cette production est aujourd'hui consommée sur le marché intérieur. L'Union européenne suit les États-Unis et le Brésil dans les niveaux de production d'éthanol, atteignant 5443 millions de litres en 2019 (5% de la production mondiale). Enfin, il est important de souligner l'expansion rapide de la capacité de production d'éthanol en Chine qui a atteint 3403 millions de litres en 2019 (Susmozas *et al.*, 2020).

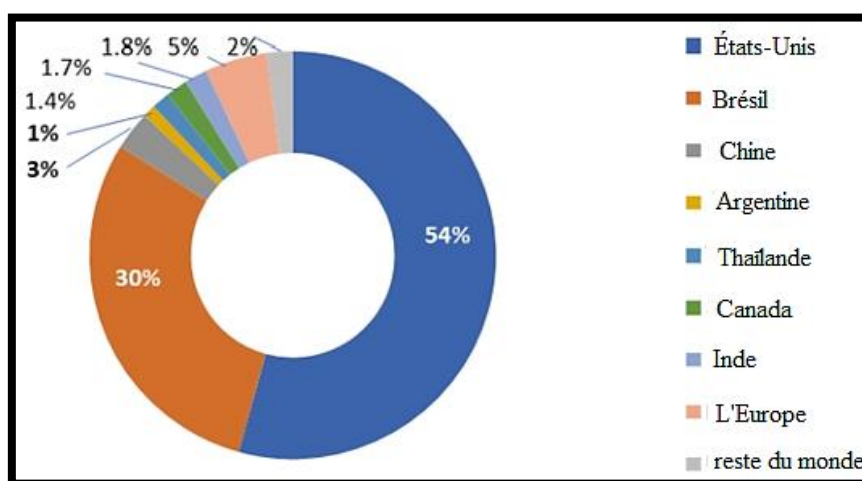


Figure 16. Production d'éthanol carburant par pays (part de la production mondiale) en 2019 (Susmozas *et al.*, 2020).

En 2021-2022, sur une année, la consommation du bioéthanol dans l'Union européenne devrait ainsi progresser de près de 1 million de tonnes. La production devrait également augmenter, mais la hausse sera limitée par les capacités de production existantes (**Net 05**). Pour couvrir le besoin intérieur, les importations du bioéthanol sont par conséquent attendues en hausse de 250 000 tonnes. Elles pourraient progresser en provenance des États-Unis notamment, et cela malgré le rebond de la demande locale outre-Atlantique. En 2022, l'Agence de l'énergie américaine (EIA) prévoit, en effet, une hausse de la consommation d'essence de plus de 7% dans le pays, ce qui soutiendra la demande en éthanol (Figure 17) (**Net 05**).

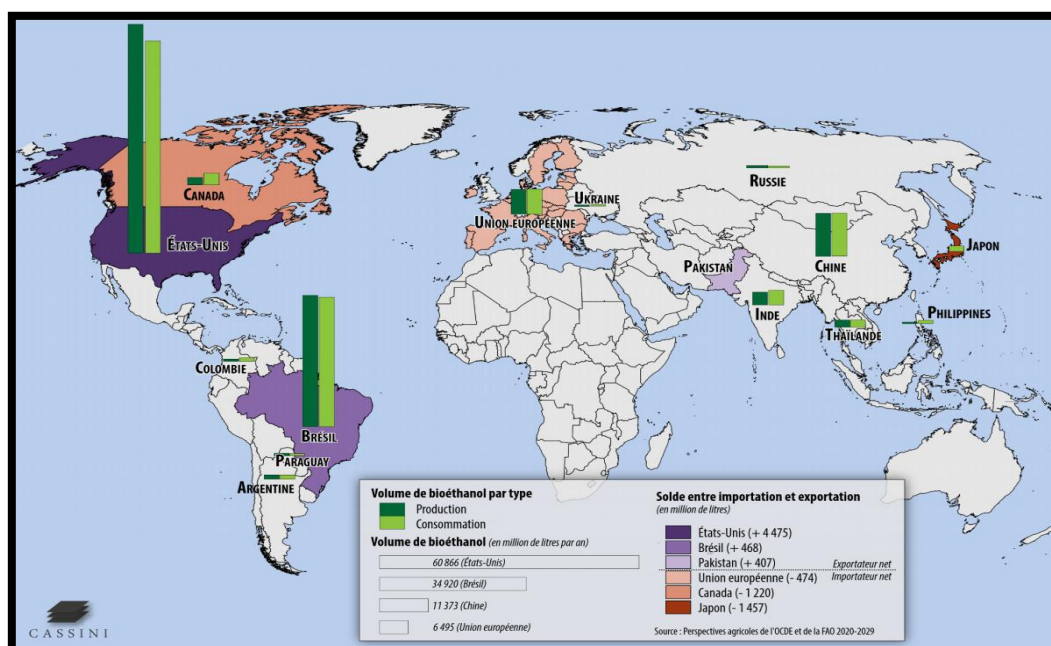


Figure 17. Principaux producteurs et consommateurs de bioéthanol dans le monde (**Antoine et al., 2021**).

2.5.2. A l'échelle continentale

L'Afrique pourrait devenir dans un futur proche un gros producteur de bioéthanol produit à partir de la canne à sucre mais également à partir du sorgho à sucre, de la cassave ou du maïs (**ICDES, s.d.**) Les opportunités de production de bioéthanol sur le continent africain tiennent à trois facteurs : premièrement la disponibilité de matières premières accompagnée de la possibilité d'augmenter la production de sucre (indispensable dans certains pays africains). Enfin, l'existence d'industries bien établies dans certains pays offre la possibilité de créer une filière bioéthanol. Des opportunités sont disponibles à la fois sur le marché intérieur et à l'exportation marchés (**IRENA, 2016**).

Depuis 1982, la société *Ethanol Compagny* (ETHCO) de la république du Malawi fabrique de l'éthanol à base de mélasse de canne à sucre à des fins combustibles. Au Zimbabwe, un programme de bioéthanol combustible est lancé en 1980. Plus récemment au Ghana, une unité de production d'une capacité de 150 millions de litres annuels de bioéthanol de canne à sucre a été mise en œuvre (**Net 06**). On compte actuellement au moins 11 pays africains qui créent des règles pour la production et la commercialisation du bioéthanol, en Afrique du Sud, en Angola et au Mozambique (**Alsif, 2010**).

La production de bioéthanol en Afrique fut de 439 millions de litres en 2006, provenant principalement de l'Afrique du Sud (Figure 18) (**Pasket, 2007**).

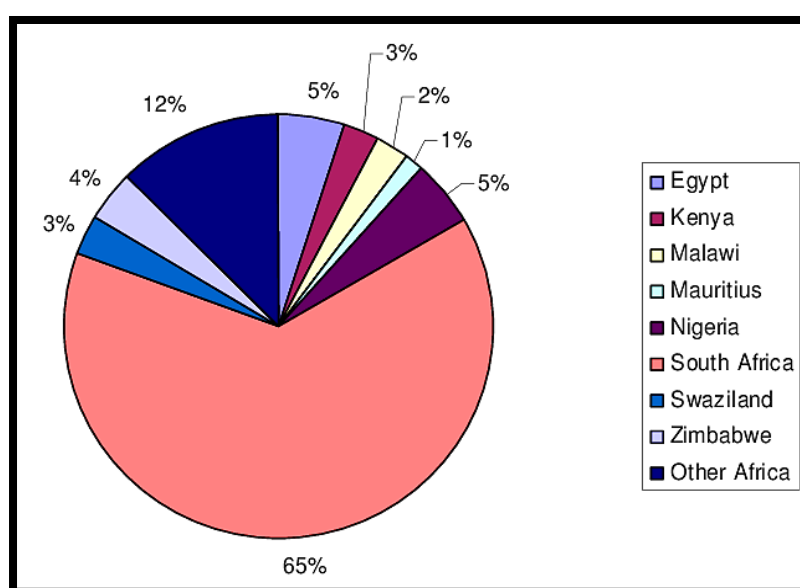


Figure 18. Production de bioéthanol en Afrique (2006) (**Pasket, 2007**).

De l'année 2013 à 2016, le pays le plus producteur, le Kenya, atteint en moyenne 0.85 (TB thousands barrel/day) (milliers de barils /jour), ce qui représente 25% de la production totale du bioéthanol en Afrique. Un autre contributeur important est le Soudan avec une production de 0.7 TB/jour (21 %) (**Wirnkor et al., 2020**). Les autres pays producteurs de bioéthanol sont représentés présentent dans le tableau suivant :

Tableau 08. Les principaux pays producteurs de bioéthanol en Afrique (**Wirnkor et al., 2020**).

Pays	TB/jour	Pourcentages
Zimbabwe	0.55	17%
Égypte	0.53	16%
Malawi	0.34	11%
Éthiopie	0.28	8%

Mozambique	0.08	2%
Nigéria	0	0%

Le marché intérieur du bioéthanol est attractif dans de nombreux cas. C'est d'abord parce que les prix du carburant sont élevés, et la demande des carburants dans les pays africains augmente rapidement. Deuxièmement, le bioéthanol remplace le plomb, qui est nuisible.

La demande de carburants de transport de l'Éthiopie, le Kenya, le Nigéria et l'Afrique du Sud à eux seuls représenteront plus de 4 100 pétajoule (PJ) d'ici 2030 (IRENA, 2015). L'expérience illustre la valeur économique et sociale du remplacement du pétrole importé pour le carburant, d'autant plus que très peu les pays ont des raffineries et doivent importer des produits pétroliers raffinés coûteux (IRENA, 2016). L'industrie sucrière offre un bon point de départ pour la production de bioéthanol en Afrique. Ainsi, la production du bioéthanol de canne à sucre séduit particulièrement le continent africain pour plusieurs raisons qui sont représentées dans le tableau (09) (IRENA, 2016).

Tableau 09. Avantages de la production du bioéthanol à partir de la canne à sucre en Afrique (IRENA, 2016).

Avantages de la production du bioéthanol à partir de la canne à sucre
<ul style="list-style-type: none"> - De grandes quantités de canne à sucre disponibles comme matière première pour la production de bioéthanol - Potentiel important d'expansion agricole, compte tenu des taux d'utilisation des terres inférieurs à 25 % dans au moins 11 pays africains - Une opportunité d'augmenter la production de sucre, ce qui est crucial pour certaines opportunités africaines - Des industries bien établies dans certains pays, offrant des opportunités d'introduire le bioéthanol dans les marchés intérieurs et d'exportation

2.5.3. A l'échelle nationale

L'Algérie "Phoenicia" a connu un progrès important dans les cultivars de palmiers dattiers : elle a obtenu 18 000 000 de palmiers. Les dattes sont riches en sucres biodégradables d'environ 73 à 83% en masse sèche sous deux formes inversées, glucose et fructose. Divers produits peuvent être dérivés de matières premières de dattes comme les biocarburants. L'économie algérienne repose principalement sur les énergies fossiles. L'Algérie importe environ 30 000 à 50 000 hectolitres (hl) d'alcool éthylique par an pour ses bons usages. Pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles et aux importations de produits chimiques

produits, le gouvernement algérien a développé un programme national de 2011 à 2030 pour promouvoir des actions concrètes dans les domaines de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables (**Boulal *et al.*, 2017**).

Une utilisation maximisée des ressources naturelles est la stratégie recommandée qui a un sens économique, écologique et logistique pour l'Algérie. Cela permet aux populations agraires de satisfaire leurs besoins énergétiques de manière plus autonome. En effet, la paille agricole est peu disponible comme ressource énergétique pour la production de bioéthanol en Algérie à cause d'autres usages. Mais les populations d'Alfa inexploitées et les grignons d'olive sont une source très importante de bioénergie renouvelable à considérer comme matière première (**Gares *et al.*, 2020**).

Chapitre III
Production du
bioéthanol de
deuxième génération

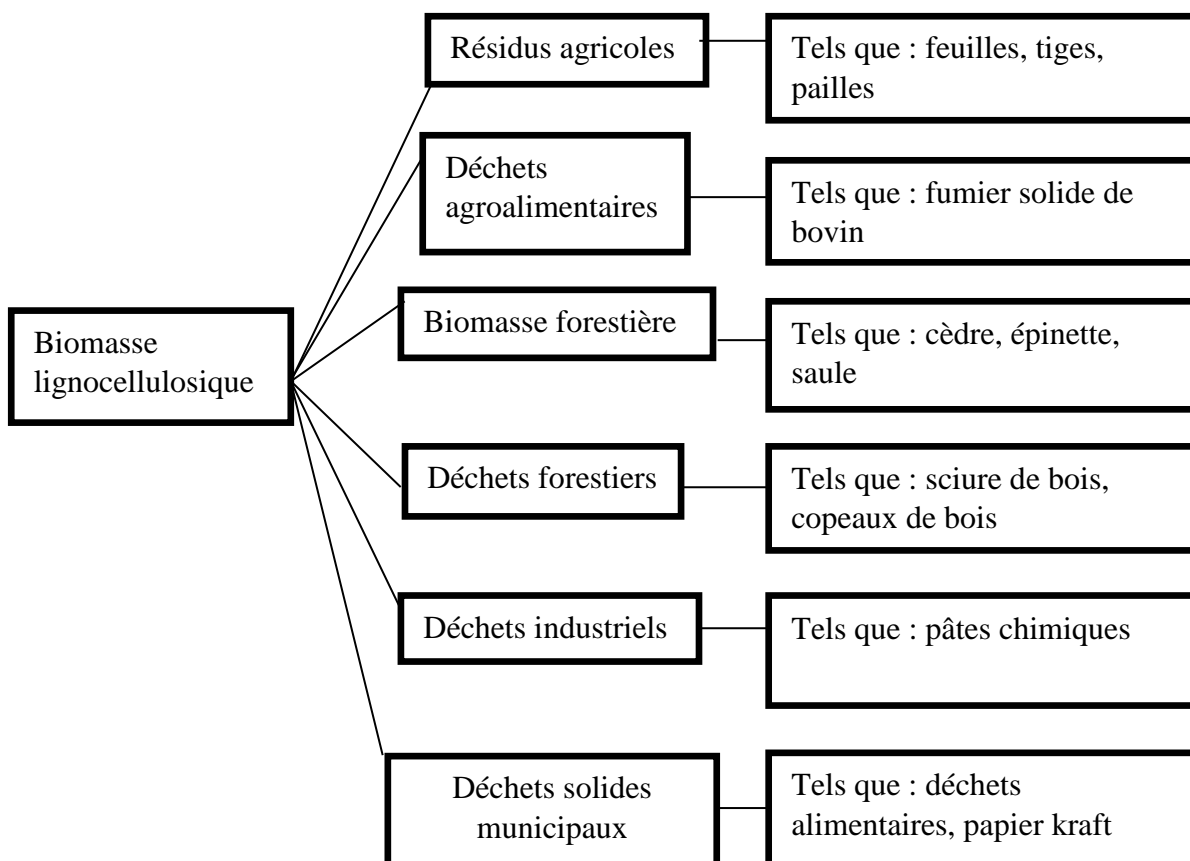
1. Biomasse lignocellulosique

1.1. Définition de la biomasse lignocellulosique

La biomasse lignocellulosique est l'une des ressources organiques les plus abondantes au monde et représente une source prometteuse des énergies renouvelables et des bioproduits. Elle est constituée principalement de trois fractions, la cellulose, l'hémicellulose et la lignine, qui confèrent une structure récalcitrante (Woiciechowski *et al.*, 2020). Les matières premières de la biomasse lignocellulosique disponibles pour la destination énergétique proviennent essentiellement des secteurs suivants : l'agriculture, les forêts et l'industrie. Les déchets et résidus agricoles et forestiers sont les matières premières (biomasse) les plus prometteuses, au regard de leur abondance et leur coût relativement faible (Cai *et al.*, 2017).

1.2. Ressources de la biomasse lignocellulosique

Les différentes sources de la biomasse lignocellulosique sont présentées comme suit (Abo *et al.*, 2019) :



1.3. Composition de la biomasse lignocellulosique

La lignocellulose, matériau composite synthétisé par les cellules végétales, est principalement composé de polymères glucidiques (cellulose et hémicellulose) et de lignine, polymère aromatique entrelacés formant une structure complexe (Figure 19) (De Bhowmick *et al.*, 2017).

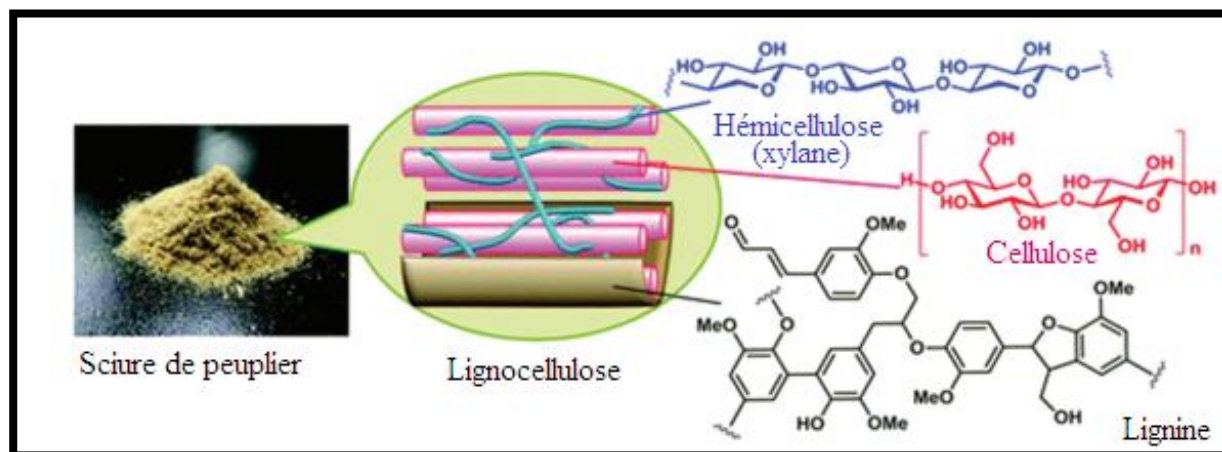


Figure 19. Structure de la biomasse lignocellulosique (Abo *et al.*, 2019).

La fraction lignocellulosique des plantes vasculaires contient également une faible proportion de pectines (Passicouset, 2019). La cellulose constitue 30 à 50 % de la matière sèche lignocellulosique totale, tandis que l'hémicellulose et la lignine (apporte de la rigidité à la structure) constituent 20 à 35% et 15 à 25% de la matière sèche totale, respectivement (Figure 20) (Sudarsanam *et al.*, 2018).

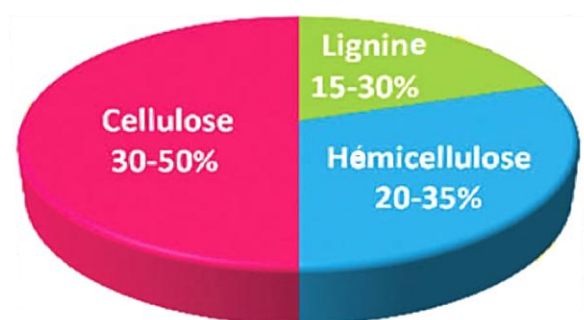


Figure 20. Composition de la biomasse lignocellulosique avec les constituants majeurs : cellulose, lignocellulose et lignine (Sudarsanam *et al.*, 2018).

La proportion entre chacune de ces trois entités constitutives varie en fonction de la nature du matériau végétal et des paramètres externes tels que les conditions de culture ou l'état de croissance de la plante (Tableau 10) (Richel, 2012).

Tableau 10. Composition moyenne en cellulose, hémicelluloses et lignine de certains matériaux lignocellulosiques (Tayyab *et al.*, 2018).

Biomasse	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Lignine (%)
Epi de maïs	42 - 45	35 - 39	14 - 15
Paille de riz	28 - 36	23 - 28	12 - 14
Paille de blé	33 - 38	26 - 32	17 - 19
Paille d'orge	31 - 45	27 - 38	14 - 19
Miscanthus	38 - 40	25	20
Bagasse de canne à sucre	42 - 48	19 - 25	20 - 42

1.3.1. Cellulose

La cellulose ($C_6H_{12}O_5$)_n ou β -1,4-glucane est le polymère le plus abondant sur terre. Elle constitue la paroi des cellules végétales assurant la protection et le soutien des organismes végétaux (Figure 21) (Debboub, 2012).

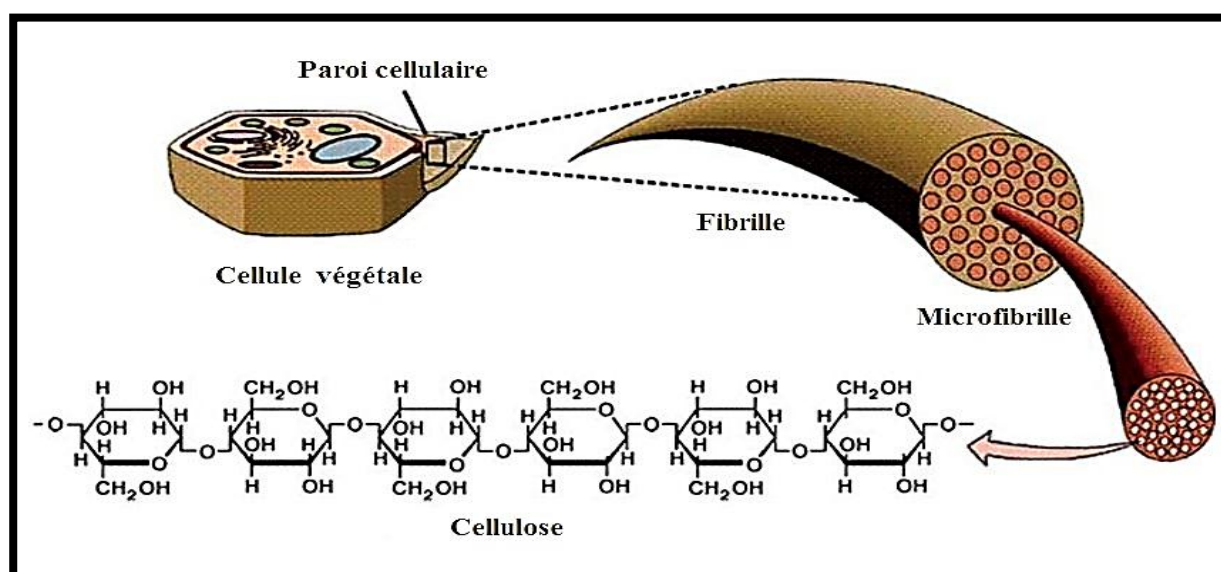


Figure 21. Disposition des fibrilles et des microfibrilles de la cellulose dans la paroi cellulaire végétale (Sharma & Aggarwal, 2020).

La cellulose est un homopolysaccharide linéaire constitué d'un enchainement d'unités de glucose (D-glucopyranose) ayant des groupements hydroxyles (OH) libres sur les positions 2, 3 et 6 et liées entre elles par des liaisons β -(1,4) glycosidiques. L'unité récurrente de la cellulose est le disaccharide cellobiose (Abo *et al.*, 2019 ; Alio, 2020 ; Debboub, 2012). La structure de la cellulose est décrite sur la (Figure 22).

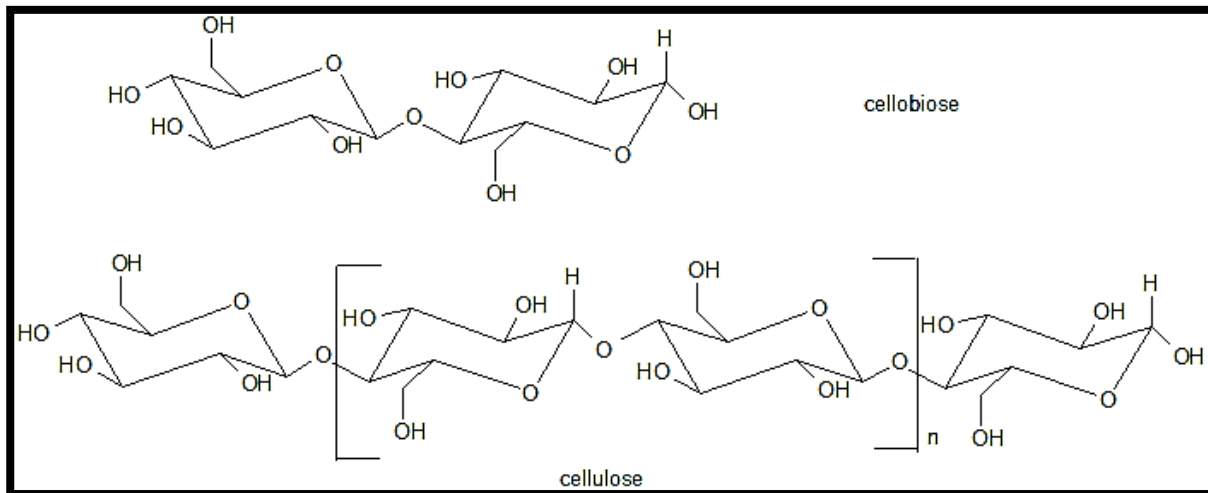


Figure 22. Structure de la cellulose (Net 07).

En raison de la structure linéaire et assez régulière de la cellulose et des nombreux groupes hydroxyles de la molécule, les polymères cellulosiques peuvent former des structures cristallines ordonnées maintenues ensemble par des liaisons hydrogènes inter et intramolécules (Figure 23) (Zergane, 2021).

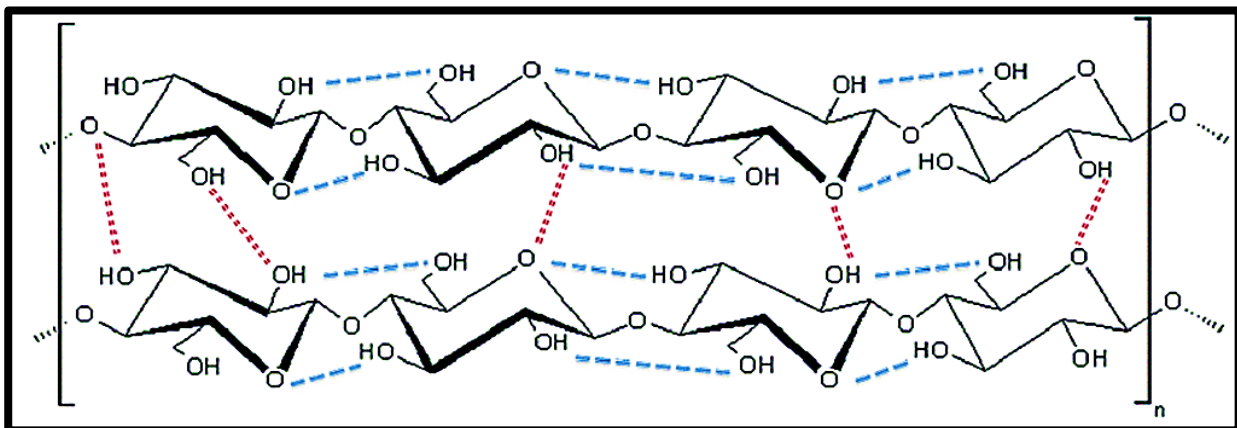


Figure 23. Représentation schématique des liaisons hydrogène intramolécules (bleues) et intermolécules (rouges) des chaînes de cellulose (Rebiere, 2017).

La figure (24) montre deux types de structure se forment dans les microfibrilles de cellulose : la première est une structure cristalline (résistant à l'hydrolyse enzymatique) hautement ordonnée et la seconde est une structure désordonnée ou amorphe (beaucoup plus sensible aux agressions physiques et chimiques), qui relie les régions cristallines entre elles pour donner des fibrilles plus longues. La haute cristallinité de la cellulose et les nombreuses

liaisons hydrogène des fibres de celluloses rendent la cellulose est insoluble l'eau et dans la plupart des solvants organiques classiques (Abo *et al.*, 2019 ; Zergane, 2021).

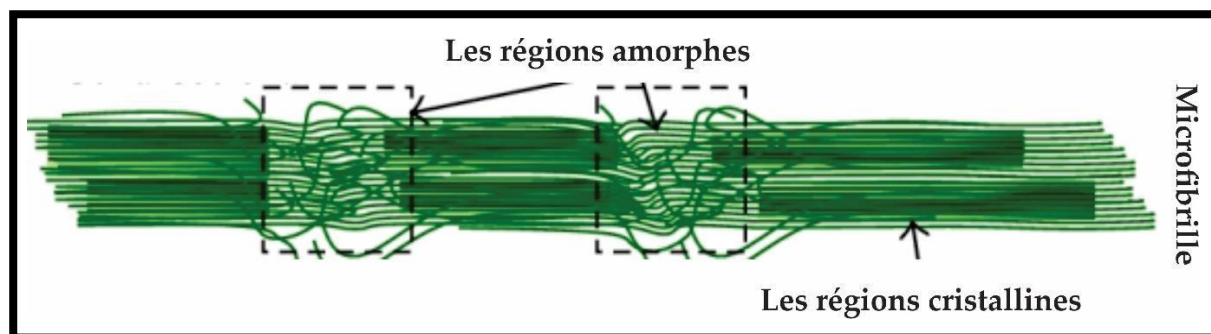


Figure 24. Schéma des structures cristalline et amorphe de la cellulose (Zergane, 2021).

1.3.2. Hémicellulose

L'hémicellulose représente le deuxième constituant chimique le plus abondant composant la biomasse végétale, après la cellulose (Zergane, 2021). Les hémicelluloses sont des hétéropolysaccharides composés de différents monosaccharides y compris les hexoses comme le glucose, le mannose et le galactose, et des pentoses comme le xylose et l'arabinose, ainsi que des acides hexuronique comme l'acide glucuronique et l'acide galacturonique (Figure 25). Les hémicelluloses sont capables de se lier à la cellulose par de multiples liaisons par pont hydrogène et à la lignine par des liaisons covalentes. En effet, ils jouent un rôle structurel dans les plantes lignocellulosiques en permettant la liaison entre la cellulose et la lignine (Abo *et al.*, 2019 ; Alio, 2020).

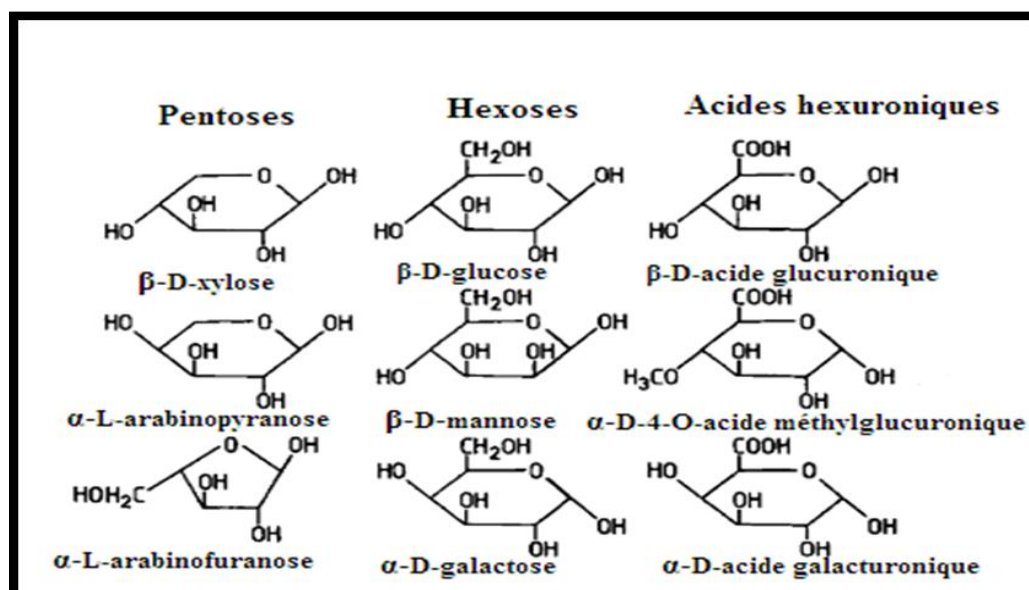


Figure 25. Principaux glucides composant les hémicelluloses (Ruiz, 2018).

Le xylane, homopolymère constitué d'unités de xylose, est le constituant le plus abondant des hémicelluloses (Figure 26). En raison de leur structure, les hémicelluloses sont plus faciles à hydrolyser que la cellulose et ils sont solubles dans l'eau (Abo *et al.*, 2019 ; Debboub, 2012).

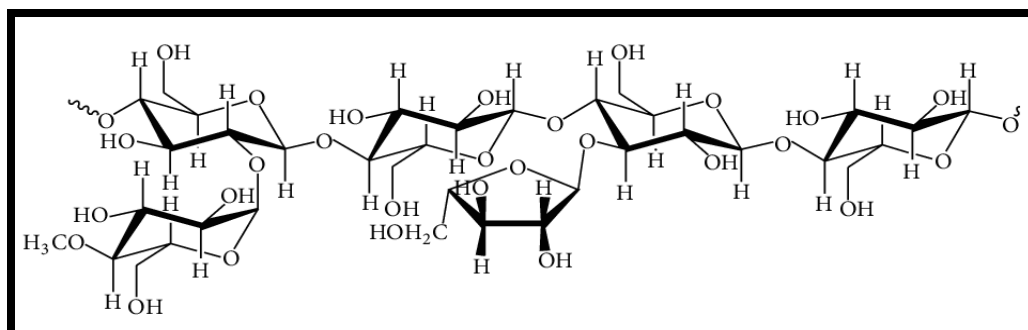


Figure 26. Schéma d'une molécule de xylane (Sharma & Aggarwal, 2020).

1.3.3. Lignine

La lignine est un composé beaucoup plus complexe que la cellulose et l'hémicellulose (Debboub, 2012). La lignine est un polymère polyphénolique réticulé dérivé principalement de trois monomères d'alcool hydroxycinnamoylé, à savoir l'alcool p-coumarylique, l'alcool coniférylique et l'alcool sinapylique (Figure 27). Ils sont de nature relativement hydrophobe et aromatique. La lignine est extrêmement résistante à la dégradation enzymatique due à sa complexité structurale. La lignine non seulement donne de la résistance au tissu végétal en raison de sa rigidité, mais elle affecte également le transport de l'eau, des nutriments et des métabolites (Alio, 2020 ; Sharma & Aggarwal, 2020).

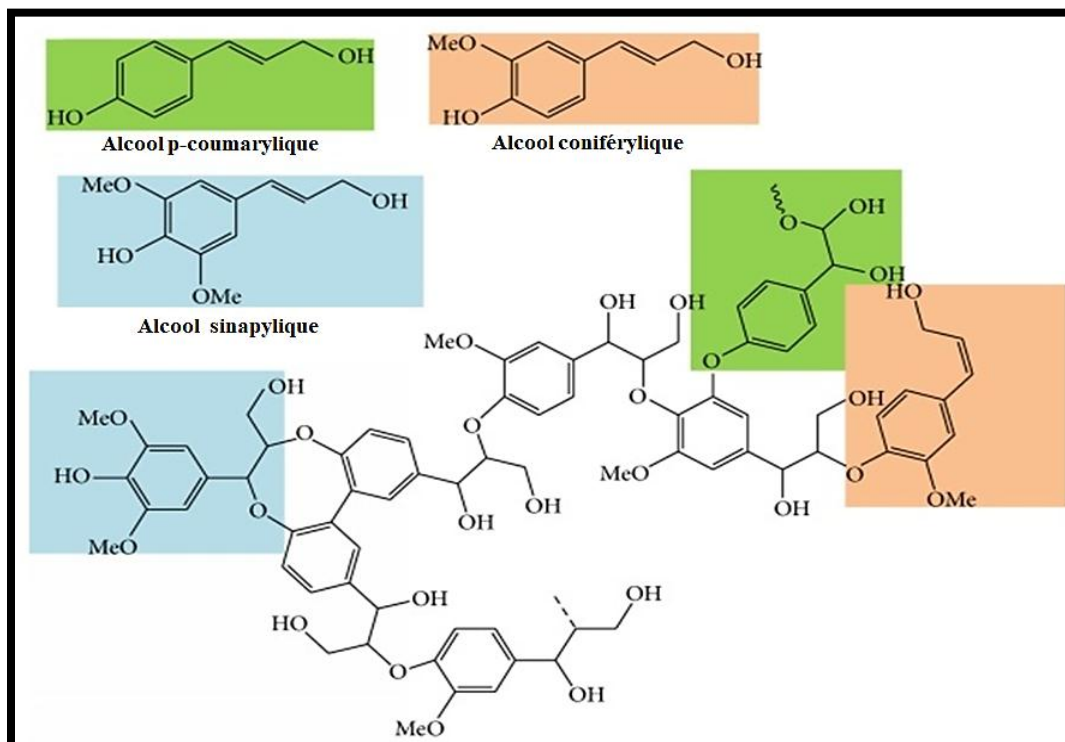


Figure 27. Structures chimiques de la lignine (Sharma & Aggarwal, 2020).

1.4. Prétraitement de la biomasse lignocellulosique

Le prétraitement est l'une des étapes les plus importantes de la conversion de la biomasse lignocellulosique en biocarburants d'un point de vue économique. Cependant, la nature rebelle et la structure hiérarchique compliquée de la biomasse lignocellulosique ont présenté le prétraitement comme l'étape la plus critique lors de la conversion de la biomasse en biocarburants. Il convient de noter que l'efficacité du prétraitement est un enjeu important pour obtenir un rendement plus élevé en combustible. L'augmentation de la surface de la biomasse, la perturbation de la matrice de la biomasse lignocellulosique et la dissolution de l'hémicellulose et/ou de la lignine, ainsi que la réduction de la taille des particules de la biomasse sont les objectifs les plus importants de l'étape du prétraitement (Figure 28) (Rezania *et al.*, 2020).

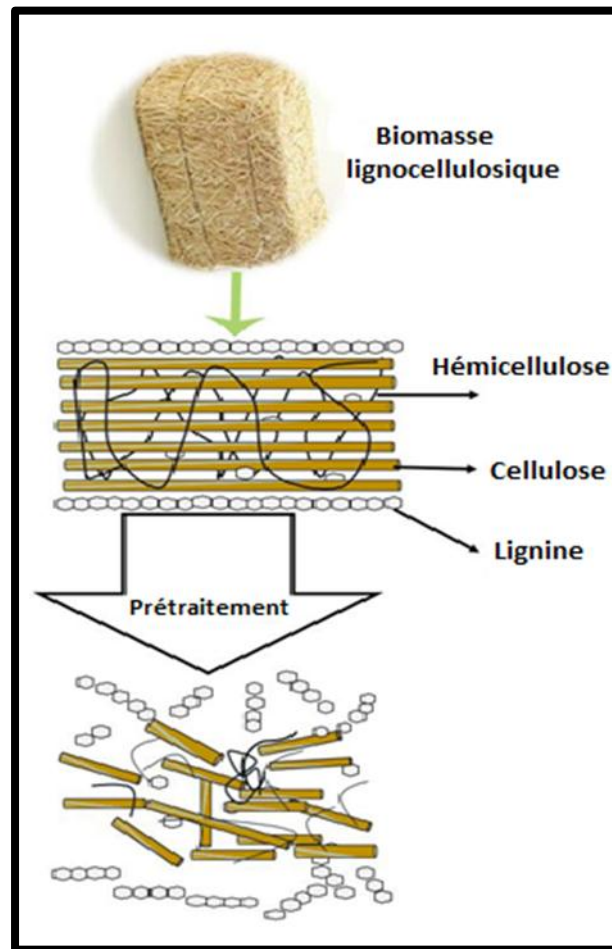


Figure 28. La biomasse lignocellulosique après prétraitement (Tayyab *et al.*, 2018).

Pour un prétraitement efficace de la biomasse lignocellulosique, plusieurs facteurs importants doivent être pris en compte lors de la sélection et de l'établissement des paramètres d'une méthode de prétraitement idéale. A savoir une formation minimale d'inhibiteurs de fermentation tels que les acides faibles, le furfural, l'hydroxyméthyl furfural (HMF) ; efficacité énergétique ; efficacité contre les matériaux riches en lignine ; polyvalence des matières premières ; potentiel de sous-produits et la possibilité d'évolutivité commerciale avec de faibles risques technologiques et environnementaux. Ce sont les raisons qui rendent cette étape cruciale, car elle a une grande influence sur l'ensemble de la technologie de production de bioéthanol (Maican *et al.*, 2015).

Les technologies du prétraitement traditionnel utilisent des méthodes physiques, chimiques et biologiques, ou une combinaison de ceux-ci (Maican *et al.*, 2015). Pour ces méthodes, différents types de matériaux ont été utilisés comme indiqué dans la figure (29) (Rezania *et al.*, 2020).

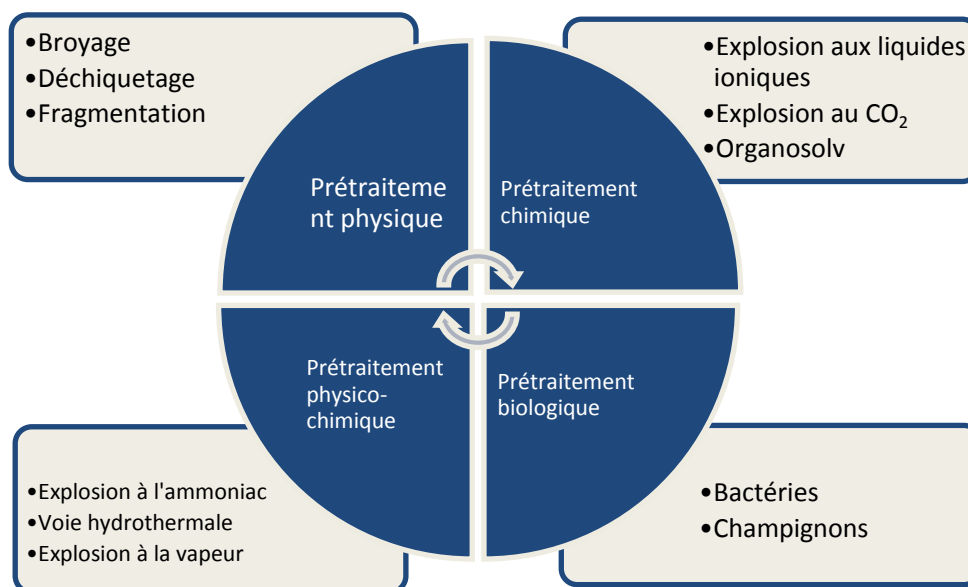


Figure 29. Facteurs clés pour un prétraitement efficace de la biomasse lignocellulosique (Alio, 2020).

1.4.1. Procédés de prétraitement de la biomasse lignocellulosique

1.4.1.1. Prétraitement physique

La fragmentation, le déchiquetage, le broyage sont parmi les diverses méthodes de réduction mécanique de la taille de la biomasse lignocellulosique, qui sont utilisées pour améliorer sa digestibilité, augmenter la surface spécifique disponible et réduire à la fois le degré de polymérisation (DP) et la cristallinité de la cellulose. Le broyage et le déchiquetage sont plus efficaces pour réduire la taille des particules et la cristallinité de la cellulose que l'écaillage. Ils peuvent réduire la taille des particules à 0.2-2 mm. Cependant, il a été démontré qu'une réduction supplémentaire de la taille des particules de biomasse en-dessous de 0.4 mm avait peu d'effet sur les taux des rendements d'hydrolyse de la biomasse. Des études ont montré que le broyage augmente les rendements en biogaz, en biohydrogène et en bioéthanol (Alio, 2020). Etant donné les exigences énergétiques élevées de ce processus à l'échelle industrielle et l'augmentation de la demande d'énergie, il est peu probable qu'il reste économiquement viable. Toutefois, comme le broyage peut être effectué avant ou après le prétraitement chimique, des études récentes montrent que le broyage après le prétraitement chimique réduira considérablement :

- ✓ La consommation d'énergie de broyage ;
- ✓ Le coût de la séparation solide-liquide car les copeaux prétraités peuvent être facilement séparés ;
- ✓ Les besoins en mélange à forte intensité énergétique des suspensions de prétraitement ;
- ✓ Le rapport liquide-solide ;
- ✓ La production d'inhibiteurs de fermentation (Alio, 2020).

1.4.1.2. Prétraitement physico-chimique

Cette catégorie comprend la grande majorité des technologies de prétraitement. Le tableau (11) représente certains exemples des procédés utilisés dans ce type de prétraitement :

Tableau 11. Exemples des procédés appliqués dans le prétraitement physico-chimique (Alio, 2020 ; Fong Lopez, 2019 ; Wertz, 2016).

Procédé physico-chimique	Explication	Effet
Explosion à la vapeur « PV »	- Injection de la vapeur à haute pression (comprise entre 0.7 et 4.8 MPa), à des températures d'environ 160 à 240°C, pendant quelques secondes - suivi d'une détente brutale à pression atmosphérique (Alio, 2020).	- Provoquer une séparation des fibres et la rupture de la paroi cellulaire ; - Réduire la cristallinité de la cellulose et perte des lignines (Fong Lopez, 2019).
Explosion à l'ammoniac « AFEX » (Ammonia Fiber Explosion)	- Mise en contact la biomasse avec une charge d'ammoniac liquide anhydre dans un rapport de 1/1 à 2/1 (1 à 2 kg d'ammoniac/kg de biomasse sèche) pendant 10 à 60 min à 60-90°C et à des pressions supérieures à 3 MPa. - Le mélange de biomasse et d'ammoniac est chauffé pendant 30 min à la température souhaitée, dans un récipient fermé sous pression. - Après avoir maintenu la température cible pendant environ 5 min, la soupape d'aération est ouverte rapidement pour relâcher la pression de manière explosive (Alio, 2020).	- Augmenter la capacité de rétention d'eau et la digestibilité. - Augmenter nettement la sensibilité de la biomasse lignocellulosique prétraitée à une hydrolyse enzymatique ultérieure. - Améliorer de manière significative les taux de saccharification des plantes herbacées, des résidus agricoles et des déchets urbains solides

		(Alio, 2020).
Voie hydrothermale « Solvolysé, aquasolv, fractionnement en phase aqueuse »	- Consiste à utiliser l'eau à haute température et haute pression - Les températures peuvent aller de 160 à 240°C pour des durées allant de quelques minutes à une heure, et des concentrations en solide inférieures à 20% (Wertz, 2016).	- permet la solubilisation de l'hémicellulose - Dans certaines conditions de haute sévérité, les lignines sont retrouvées sous forme de gouttelettes à la surface des fibres ce qui diminue l'accessibilité des enzymes à la cellulose (Fong Lopez, 2019).

1.4.1.3. Prétraitement chimique

Certains produits chimiques tels que les acides, les alcalis, les solvants organiques et les liquides ioniques ont des effets importants sur la structure native de la biomasse lignocellulosique (Alio, 2020). Ceci explique la diversité des prétraitements chimiques utilisés industriellement. Le tableau (12) présente quelques exemples :

Tableau 12. Exemples des procédés appliqués dans le prétraitement chimique (Alio, 2020 ; Bichot *et al.*, 2018 ; Fong Lopez, 2019).

Procédé chimique	Explication	Effet
Prétraitement aux liquides ioniques	- Il consiste à utiliser des liquides Ioniques qui sont une nouvelle classe de solvants avec des températures de fusion en dessous de 100°C, de forte polarité, une bonne stabilité thermique et une pression de vapeur négligeable, entièrement constitués d'ions (cations organiques et anions inorganiques ou organiques) (Alio, 2020 ; Bichot <i>et al.</i> , 2018).	- Dissolution efficace de la cellulose dans des conditions douces - Attaque des liaisons entre les différents composés de la lignocellulose, donc une séparation efficace de la cellulose, des lignines et des hémicelluloses (Fong Lopez, 2019).
Prétraitement à l'explosion au dioxyde de carbone (CO₂)	- Le SC-CO ₂ est acheminé vers la biomasse placée dans un récipient à basse pression ou livré à haute pression (1000–4000 psi). - Le récipient est chauffé à la température souhaitée et maintenu pendant une durée	- Dissoudre les lignines et déstructurer les composés afin d'obtenir une surface spécifique plus élevée (Fong Lopez, 2019).

	déterminée, généralement plusieurs minutes lorsque le procédé est conduit à des températures élevées pouvant atteindre 200° C (Alio, 2020).	
Prétraitement organosolv	<ul style="list-style-type: none"> - La plupart des prétraitements organosolv sont conduits à des températures élevées (100 à 250° C) (Alio, 2020). - Utiliser des solvants organiques tels que l'éthanol, le méthanol, l'acétone ou l'éthylène glycol (Bichot <i>et al.</i>, 2018). 	<ul style="list-style-type: none"> - Eliminer considérablement la lignine - Entraîner une solubilisation presque complète de l'hémicellulose (dépendent de la nature du solvant) (Alio, 2020 ; Fong Lopez, 2019).

1.4.1.4. Prétraitement biologique

Le traitement biologique comparé aux méthodes traditionnelles telles que le prétraitement chimique et physique est considéré comme un processus efficace, écoénergétique et respectueux de l'environnement (Alio, 2020). Cette méthode utilise principalement des microorganismes, tels que les bactéries ou les champignons de la pourriture blanche, brune et molle. Ils sont employés pour dégrader les composants de la biomasse sur la base de leurs systèmes enzymatiques. Les champignons de la pourriture brune et molle attaquent principalement les polysaccharides, et ne dégradent pas beaucoup la lignine, tandis que les champignons de la pourriture blanche sont les plus efficaces pour dégrader la lignine et pour le prétraitement biologique de la biomasse lignocellulosique (Wertz, 2016).

La cinétique du prétraitement biologique est cependant trop lente pour des applications industrielles. Le temps de séjour est de 10 à 14 jours, l'exigence des conditions de croissance et l'espace important nécessaire aux prétraitements biologiques sont les inconvénients qui rendent cette méthode de prétraitement peu attrayante au niveau industriel. Le fait que le micro-organisme consomme une partie de la fraction glucidique constitue également un inconvénient (Alio, 2020).

1.4.2. Avantages et inconvénients de prétraitement de la biomasse lignocellulosique

Le tableau (13) regroupe les avantages et les inconvénients des différents prétraitements. Chaque prétraitement permet de modifier la structure chimique et/ou physique de la biomasse afin d'augmenter l'accessibilité (Fong Lopez, 2019).

Tableau 13. Avantages et désavantages des prétraitements de la biomasse lignocellulosique utilisés (Fong Lopez, 2019).

Prétraitement	Type de prétraitement	Avantage	Inconvénients
Physique	Broyage	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la surface spécifique accessible - Diminution de la cristallinité de la cellulose 	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation élevée d'énergie - Coût élevé - Faible rendement
Biologique		<ul style="list-style-type: none"> - Plus respectueux de l'environnement car conditions douces - Pas de production d'inhibiteurs 	<ul style="list-style-type: none"> - Temps de réaction long
Physico-chimique	Explosion à la vapeur	<ul style="list-style-type: none"> - Transformation et solubilisation des lignines - Rendements élevés en glucose et hémicellulose 	<ul style="list-style-type: none"> - Production d'inhibiteurs
	Explosion à l'ammoniac	<ul style="list-style-type: none"> - Rupture des lignines - Décristallisation de la cellulose - Pas besoin de réduction de taille 	<ul style="list-style-type: none"> - Peu d'efficacité pour des biomasses avec importante fraction de lignine - Coût important de l'ammoniaque
	Voie hydrothermale	<ul style="list-style-type: none"> - Ne requière pas de réduction de taille - Ne requière pas de catalyseur 	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation élevée d'eau et d'énergie
Chimique	liquides ioniques	<ul style="list-style-type: none"> - Solubilisation des composés lignocellulosique - Affaiblissement des liaisons hydrogènes entre les microfibrilles de 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé - Haute toxicité - Proviennent d'industrie

		cellulose - Augmente la surface spécifique	pétrochimique
	l'explosion au dioxyde de carbone	- Solubilisation des lignines - Hausse de la surface spécifique par rupture des composés - Faible coût du CO ₂	- Coût des installations élevé
	Organosolv	- Solubilise des lignines et hémicelluloses - Faible production d'inhibiteurs	- Couteux - Besoin de recycler le solvant

2. Hydrolyse

La fabrication du bioéthanol nécessite un processus d'hydrolyse à la suite de l'étape de prétraitement de la biomasse lignocellulosique. L'étape d'hydrolyse implique une dépolymérisation supplémentaire de la cellulose et/ou l'hémicellulose en sucres simples fermentescibles, qui sont ensuite utilisés pour la fermentation alcoolique (Figure 30) (**Abo et al., 2018 ; Alio, 2020**).

En raison de sa structure cristalline, l'hydrolyse de la cellulose est plus difficile que celle de l'hémicellulose. Ainsi, l'hydrolyse de la biomasse lignocellulosique nécessite d'être catalysée soit par un acide (dilué ou concentré), on l'appelle alors hydrolyse chimique, soit par des enzymes spécifiques, on l'appelle alors hydrolyse enzymatique (aussi appelée hydrolyse biochimique ou saccharification) (**Abo et al., 2018**).

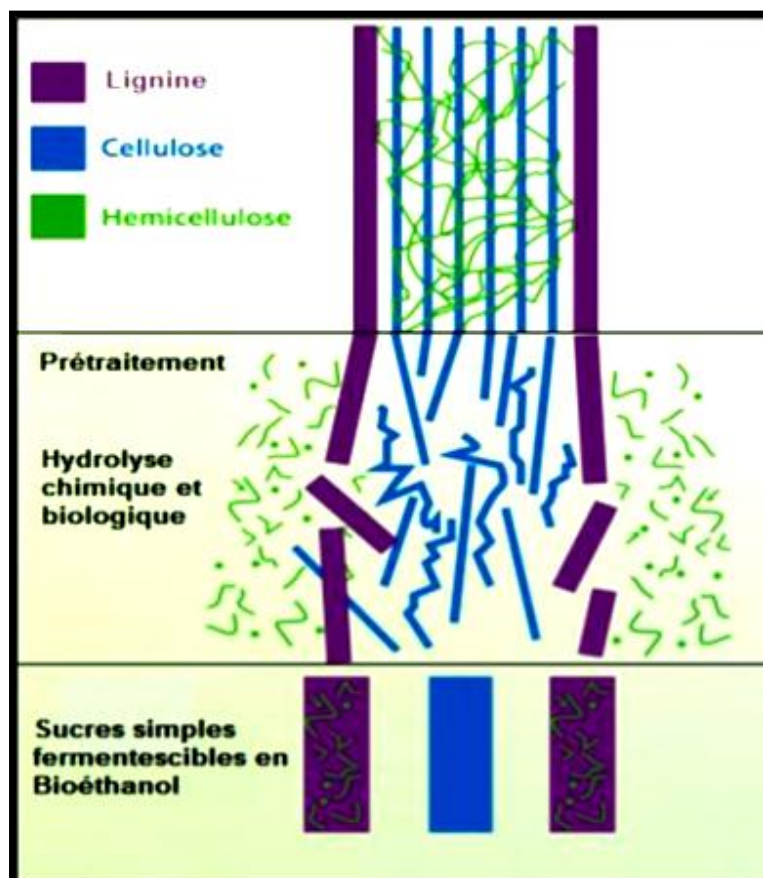


Figure 30. Schéma du procédé d'hydrolyse (Eloutassi *et al.*, 2014).

2.1. Hydrolyse chimique

L'hydrolyse chimique est l'un des procédés mis en œuvre pour l'élimination des parois des cellules végétales et l'obtention des sucres. Elle est généralement réalisée en utilisant des acides comme l'acide sulfurique, qui est le plus couramment utilisé. L'hydrolyse chimique comprend deux types : hydrolyse à l'acide dilué et à l'acide concentré (Alio, 2020).

Le procédé d'hydrolyse à l'acide dilué est l'une des méthodes les plus anciennes, les plus simples et les plus efficaces pour produire de l'éthanol à partir de la biomasse lignocellulosique (Alio, 2020). Il est réalisé en deux étapes : la première étape utilise de l'acide sulfurique (0.7%) à 190°C pour hydrolyser les hémicelluloses présentes dans la biomasse. La deuxième étape est optimisée pour hydrolyser la fraction cellulosique la plus résistante. Elle est obtenue en utilisant de l'acide sulfurique (0.4%) à 215°C. Les hydrolysats liquides sont ensuite neutralisés et les composés toxiques sont éliminés avant la fermentation de la solution de sucres. Le taux de récupération du sucre peut alors atteindre un maximum de 80% (Abo *et al.*, 2018 ; Alio, 2020).

L'hydrolyse par l'acide concentré (principalement l'acide sulfurique et l'acide chlorhydrique) est également un processus en deux étapes, mais cette fois, l'acide est utilisé à une concentration de 20 à 40% à des températures plus basses (50 à 100°C) (Abo *et al.*, 2018 ; Wertz, 2016). L'avantage de ce procédé par rapport à l'acide dilué est d'atteindre un rendement de récupération des sucres plus élevé de 90% et la formation de coproduits nuisibles est aussi réduite (Chaib, 2011). Cependant, il nécessite un coût d'investissement plus élevé dû aux caractères corrosifs, toxiques et dangereux que représentent les acides et qui rendent nécessaires leur recyclage, ainsi l'utilisation de réacteurs en matériaux spéciaux pour éviter leur corrosion (Alio, 2020).

Les caractéristiques de l'hydrolyse acide peuvent être résumées dans le tableau (14).

Tableau 14. Caractéristiques de l'hydrolyse à l'acide dilué et à l'acide concentré (Wertz, 2016).

Acide dilué	Acide concentré
Effet mineur sur la cellulose	Hydrolyse de la cellulose
Hydrolyse des hémicelluloses	Hydrolyse des hémicelluloses
Altération de la lignine	Altération de la lignine
Formation d'inhibiteurs de fermentation	Formation d'inhibiteurs de fermentation

2.2. Hydrolyse enzymatique

L'hydrolyse enzymatique est réalisée par des enzymes cellulases hautement spécifiques, qui favorisent la transformation à 100% de la cellulose en glucose sans formation de produits indésirables (inhibiteurs), ce qui rend ce procédé très attractif par rapport à l'hydrolyse chimique (Abo *et al.*, 2018 ; Alio, 2020). Les trois types d'enzymes impliquées dans le processus sont les cellulases endo-1,4- β -glucanases et exo-1,4- β -glucanases, qui hydrolysent les celluloses en cellobiose, et les β -glucosidases qui hydrolysent les cellobioses en glucose (Figure 31) (Eloutassi *et al.*, 2014).

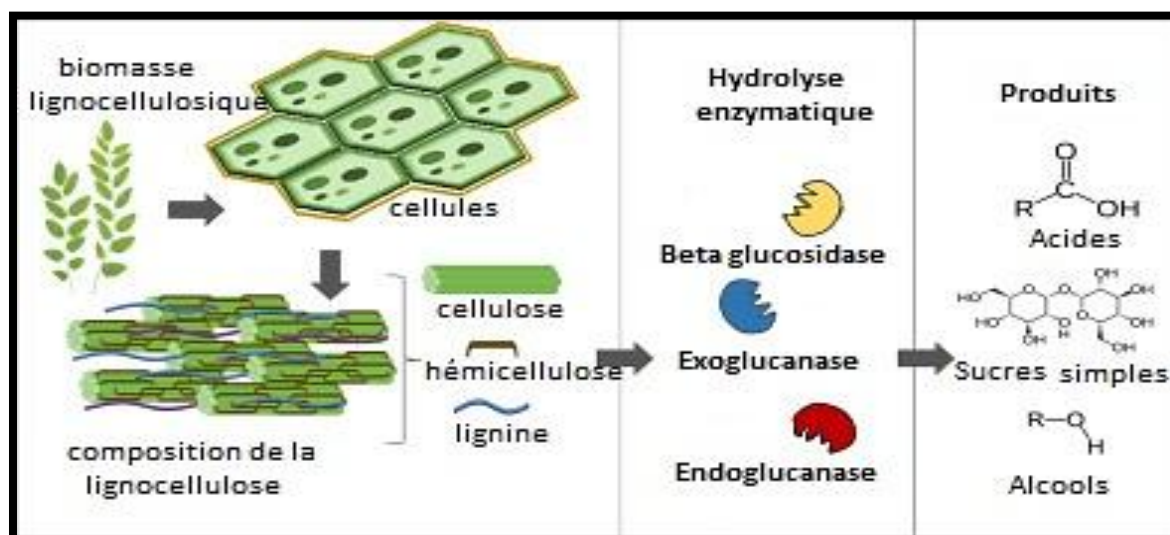


Figure 31. Présentation schématique de l'hydrolyse enzymatique de la biomasse lignocellulosique (Saldarriaga-Hernandez *et al.*, 2020).

De plus, contrairement à l'hydrolyse chimique, l'hydrolyse enzymatique est réalisée dans des conditions douces, à un pH de 4.8 et à une température de 45 à 50°C, ce qui représente les conditions optimales pour ces enzymes (Alio, 2020). L'hydrolyse enzymatique permet d'atteindre des rendements élevés des sucres simples à des taux de conversion raisonnables en utilisant un minimum d'énergie et des produits chimiques (y compris des enzymes hydrolytiques) (Stickel *et al.*, 2014). Malgré ces avantages, l'utilisation des enzymes dans les procédés industriels reste encore limitée par plusieurs facteurs : la plupart des enzymes sont relativement instables à des températures élevées, les coûts d'isolement et de purification des enzymes sont élevés et il est assez difficile de les récupérer à partir des mélanges réactionnels. Actuellement, des recherches approfondies sont menées sur les cellulases à thermostabilité améliorée. Ces enzymes ont une activité spécifique élevée et une flexibilité accrue. Pour ces raisons, elles pourraient fonctionner à de faibles doses et les températures de travail plus élevées pourraient accélérer le temps de réaction d'hydrolyse. En conséquence, les coûts globaux du processus pourraient être réduits. Les enzymes thermostables pourraient jouer un rôle important en aidant la liquéfaction des suspensions de biomasse concentrées nécessaires pour atteindre des concentrations d'éthanol dans la plage de 4 à 5 % en poids (Verardi *et al.*, 2012).

En conclusion, le tableau suivant résume les différences les plus importantes entre l'hydrolyse enzymatique et l'hydrolyse chimique.

Tableau 15. Principales différences entre l'hydrolyse enzymatique et chimique (Alio, 2020).

Hydrolyse chimique	Hydrolyse enzymatique
Crée de problème de corrosion	Ne crée pas de problème de corrosion
Rendement d'hydrolyse élevé	Rendement d'hydrolyse plus élevé
Cinétique de processus très courte	Cinétique de processus beaucoup plus lente
Formation des produits indésirables	Pas de formation des produits indésirables

3. Fermentation alcoolique

3.1. Définition de la fermentation alcoolique

La fermentation alcoolique, est un procédé biologique par lequel le sucre est converti en alcool et en dioxyde de carbone. Les levures sont responsables de ce processus et l'oxygène n'est pas nécessaire, ce qui signifie que la fermentation alcoolique est un procédé anaérobie. Les sous-produits du processus de fermentation comprennent la chaleur, le dioxyde de carbone, l'eau et l'alcool (**Net 08**). Plusieurs changements sont susceptibles d'apparaître : un dégagement de gaz carbonique, une augmentation de la température et de la couleur, un changement d'odeur et de saveur, une diminution de la densité (transformation du sucre en alcool) et une augmentation des volumes (**Burillard et al., 2016**). L'équation globale de la fermentation alcoolique est (**Net 09**) :



3.2. Les différents types de culture

Il est possible d'effectuer les fermentations en mode discontinu (*Batch*), en mode semi-continu (*Fed-batch*) ou en mode continu (**Boucher, 2014**).

3.2.1. Le mode discontinu ou *Batch*

L'éthanol peut être fabriqué en utilisant des procédés discontinus, aussi appelés le procédé en batch, dans des bioréacteurs de grands volumes, de l'ordre de 500 m³. Les cultures discontinues sont des installations fermées en phase liquide. Normalement, aucun élément n'est ajouté au milieu et la récolte se développe jusqu'à ce qu'il manque au moins un nutriment essentiel ou jusqu'à ce qu'un changement environnemental important (pH, accumulation de produits toxiques...) bloque la croissance. Cependant, il est possible de

contrôler le milieu de fermentation en régulant par exemple le pH ou le niveau de mousse, le système n'est donc pas totalement clos.

Ces types de cultures ne présentent pas de rendements constants tout au long du procédé car la composition du milieu évolue au cours de la fermentation. Les cultures en discontinu imposent des temps morts lors du remplissage et de la vidange des cuves. De plus, le système doit être stérilisé entre chaque fermentation (**Riess, 2012**).

3.2.2. Le mode semi-continu ou *Fed-batch*

Le *fed-batch* (de l'anglais to feed, pour alimenter), est le mode de culture le plus couramment utilisé industriellement. La fermentation est démarrée en discontinu puis la source de carbone et éléments nutritifs sont ajoutés par intermittence ou de façon continue sans soutirer de milieu conduisant entraînant une augmentation du volume dans la cuve au fil du temps. Le bouillon de culture est récolté généralement uniquement à la fin de la période d'exploitation, que ce soit entièrement ou partiellement (le reste servant d'inoculum pour la prochaine production) (**Husenet, 2017**).

3.2.3. Le mode continu

Il s'agit de cultures cultivées dans des réacteurs de type chémostat pour les plus simples en régime stationnaire (entrée = sortie par unité de temps). La concentration de biomasse et la productivité obtenues sont plus faibles que pour les cultures de type fed-batch vues précédemment, elles se rapprochent de celles de type batch. La source de carbone et d'autres substances nutritives sont ajoutées en continu en soutirant le milieu contenant donc les cellules, les métabolites et le substrat résiduel (**Husenet, 2017**).

3.3. Procédé de la fermentation alcoolique

Après ensemencement du milieu par la levure de boulanger *S. cerevisiae* en quantité de 1g/l, le bioréacteur est plongé dans un bain-marie où la température est maintenue à $30 \pm 2^\circ\text{C}$ et de pH entre 4.2 et 4.5. La fermentation est effectuée par voie anaérobique pendant 72 heures (Figure 32). Toutefois, la fermentation est favorisée par l'agitation provoquée par le mouvement des bulles de CO_2 libérées (**Boulal et al., 2013**).

Pour suivre l'évolution de la fermentation, des prélèvements sont effectués chaque 24 heures pour déterminer la teneur en alcool par l'alcoomètre et détecter l'odeur de l'alcool dans le moût. Après 72 heures, la fermentation est arrêtée (Boulal *et al.*, 2013).

La fermentation se déroule en milieu non renouvelable en mode discontinue. La croissance de *S. cerevisiae* peut être limitée par l'accumulation de substances toxiques. Il faut noter que les acides gras (acide octanoïque, acide decanoïque), formés par la levure deviennent toxiques à elle. Pour remédier à ce phénomène, une pincée de charbon est ajoutée aux moûts avant ensemencement pour faciliter la reprise de la fermentation (Ould El Hadj *et al.*, 2012).

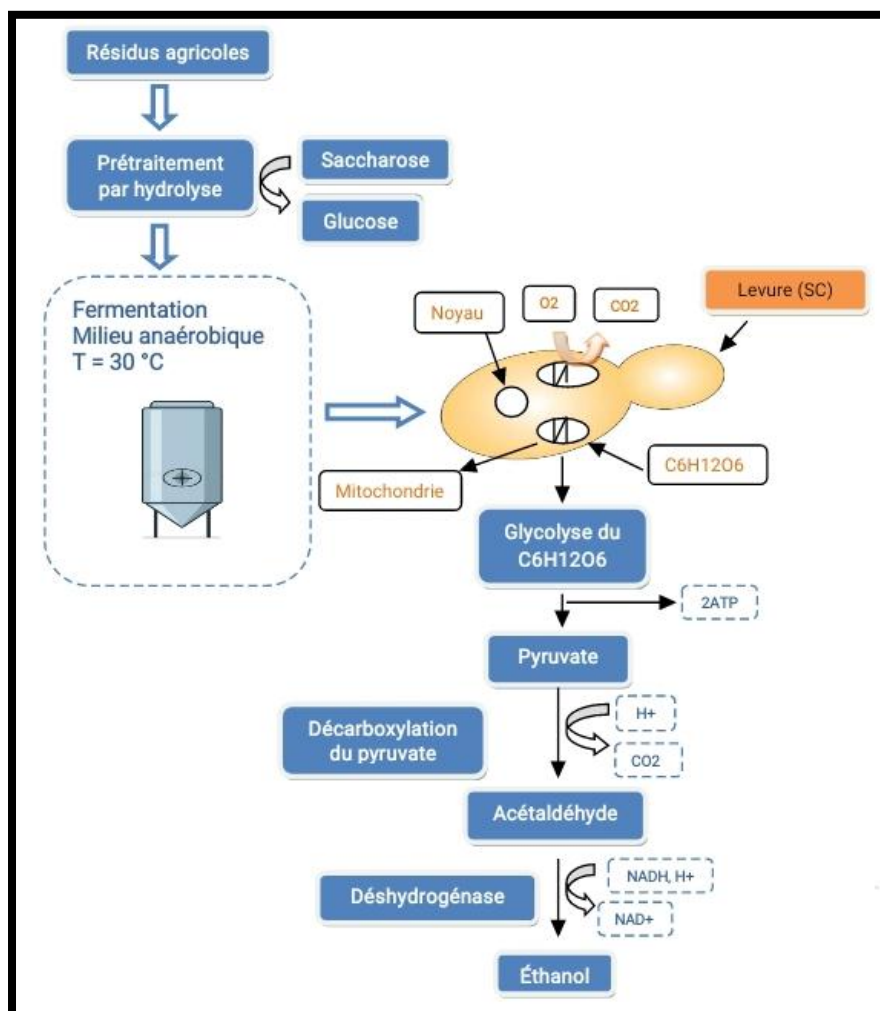


Figure 32. Principe de la fermentation alcoolique du glucose par la levure *S. cerevisiae* (SC) (Fennouche, 2017).

3.4. Paramètres de fermentation

La température et le pH sont des paramètres importants. La température optimale pour la levure *S. cerevisiae* est de 30 à 35°C. Au-delà de 38°C et en dessous de 30°C, les rendements diminuent. De plus, la fermentation étant exothermique (1.2 MJ/kg d'éthanol produit), la température peut devenir un problème pour les grandes installations et les hautes températures augmentent le caractère inhibiteur de l'éthanol.

S. cerevisiae peut fermenter à un pH minimum de 3.5. Toutefois, un pH supérieur à 5 est optimal, en réduisant la durée de la phase de latence et en favorisant le développement optimal de la levure. Cela est particulièrement vrai étant donné que le milieu de fermentation contient des espèces inhibitrices. Cette situation est rencontrée dans la fabrication de l'éthanol de deuxième génération, il est primordial d'utiliser des gammes de températures et de pH optimales (**Boucher, 2014**).

4. Extraction du bioéthanol

L'étape d'extraction est considérée comme très importante dans la conception du processus de production de bioéthanol, car elle consomme le plus d'énergie dans le processus (**Amornraksa et al., 2020**). L'éthanol et l'eau totale sont les principaux composants du bouillon après la fermentation alcoolique. Ainsi la séparation est nécessaire pour purifier le bioéthanol du bouillon de fermentation. A cet égard, la distillation classique est utilisée depuis de nombreuses années comme principale méthode de purification pour la récupération d'éthanol (**Zentou et al., 2019**). En plus de la distillation, plusieurs nouvelles techniques de séparation ont été développées pour séparer et purifier l'éthanol plus efficacement telles que, la distillation azéotropique, la distillation extractive, la séparation sur tamis moléculaire, et la pervaporation (**Amornraksa et al., 2020**).

4.1. Distillation classique

La distillation est un processus de séparation d'éthanol de l'eau par évaporation et condensation, basée sur la volatilité ou les températures d'ébullition des constituants de mélange (**Net 08**). La liqueur fermentée contient entre 8 et 15% d'alcool. L'éthanol est séparé de la liqueur par un système de distillation pour obtenir de l'éthanol pur (à 100%) (**Boucher, 2014**). Le point d'ébullition de l'éthanol est plus bas que celui de l'eau, on peut donc faire évaporer l'éthanol de façon sélective et le condenser par la distillation (**Net 10**). Bien que

cette technique soit la plus largement utilisée pour produire de l'éthanol, elle ne peut produire que de l'éthanol avec une pureté proche de 95 %, Les 5% qui restent sont en fait de l'eau, en raison de la formation de la phase azéotropique entre l'eau et l'éthanol. On tamise ensuite le mélange pour produire de l'éthanol déshydraté pur (Kunnakorn *et al*, 2013 ; Net 10). Le tableau suivant présent les principaux avantages et désavantages de la distillation classique pour l'extraction de l'éthanol.

Tableau 16. Principaux avantages et désavantages de la distillation classique (Zentou *et al.*, 2019).

Avantages	Désavantages
Récupération assez élevée d'éthanol	Consommation d'énergie et des couts élevés
Efficacité énergétique suffisante à des concentrations d'alimentation modérées	Impossibilité de sécher efficacement le produit sans coupler une séparation supplémentaire
Possibilité de simulation de processus à l'aide d'un logiciel de simulation	Températures de fonctionnement élevées conduisant à la désactivation des protéines et des microorganismes

4.2. Distillation azéotropique

Dans un processus de distillation azéotropique, un troisième composant appelé « entraîneur » est ajouté au mélange binaire de l'eau et l'éthanol pour influencer le système azéotropique de manière à ce que la collecte de produits purs soit possible (Figure 33) (Arlt, 2014). Les azéotropes sont des mélanges de deux ou plusieurs substances qui bouillent ensemble à une température constante. Il est donc impossible de les séparer directement et obtenir un produit pur par distillation (Boucher, 2014).

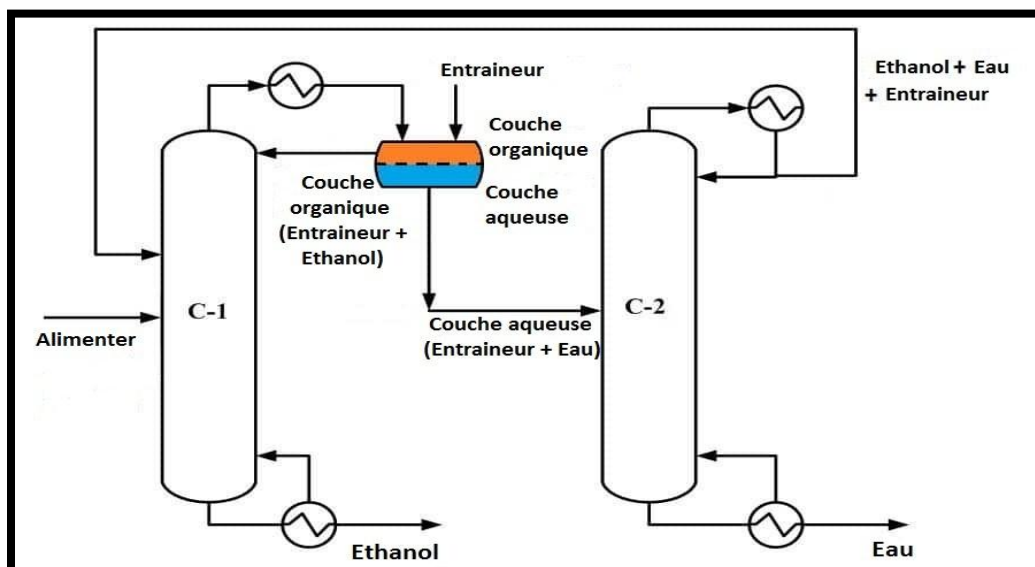


Figure 33. Le processus de la distillation azéotropique pour la déshydratation de l'éthanol (**Net 11**).

L'entraîneur ajouté agit sur la volatilité des substances contenues dans l'azéotrope, de sorte qu'un nouvel azéotrope, constitué de substances présentes dans l'azéotrope de départ du composé ajouté, se forme. Le nouvel azéotrope peut alors être éliminé par distillation, et on obtient un résidu très riche en éthanol (**Criscuoli, 2016**). Cependant, la distillation azéotropique n'est pas seulement un processus consommateur d'énergie, mais il est également néfaste pour l'environnement, en raison de la toxicité de l'entraîneur utilisé (**Kunnakorn et al., 2013**).

4.3. Distillation extractive

La distillation extractive est une distillation qui implique deux colonnes : une colonne de distillation extractive et une colonne de récupération (**Amornraksa et al., 2020**). Elle est effectuée avec un troisième constituant qui a le pouvoir de modifier les volatilités relatives des composants (modifier les températures relatives d'ébullition du mélange). Ainsi, la température d'ébullition de l'azéotrope n'est plus la plus faible (**Amornraksa et al., 2020 ; Boucher, 2014**). Ce troisième constituant peut être un liquide (comme l'éthylène glycol), un sel (acétate de potassium, acétate de sodium, etc.), un liquide ionique ou des polymères. Une étape annexe est aussi nécessaire pour recycler le constituant ajouté (Figure 34) (**Boucher, 2014**). Des études ont montré que la distillation extractive avec de l'éthylène glycol comme solvant est le meilleur choix en termes de fonctionnement et d'économie, car elle permet d'atteindre une pureté élevée d'éthanol avec une faible consommation d'énergie (**Amornraksa et al., 2020**).

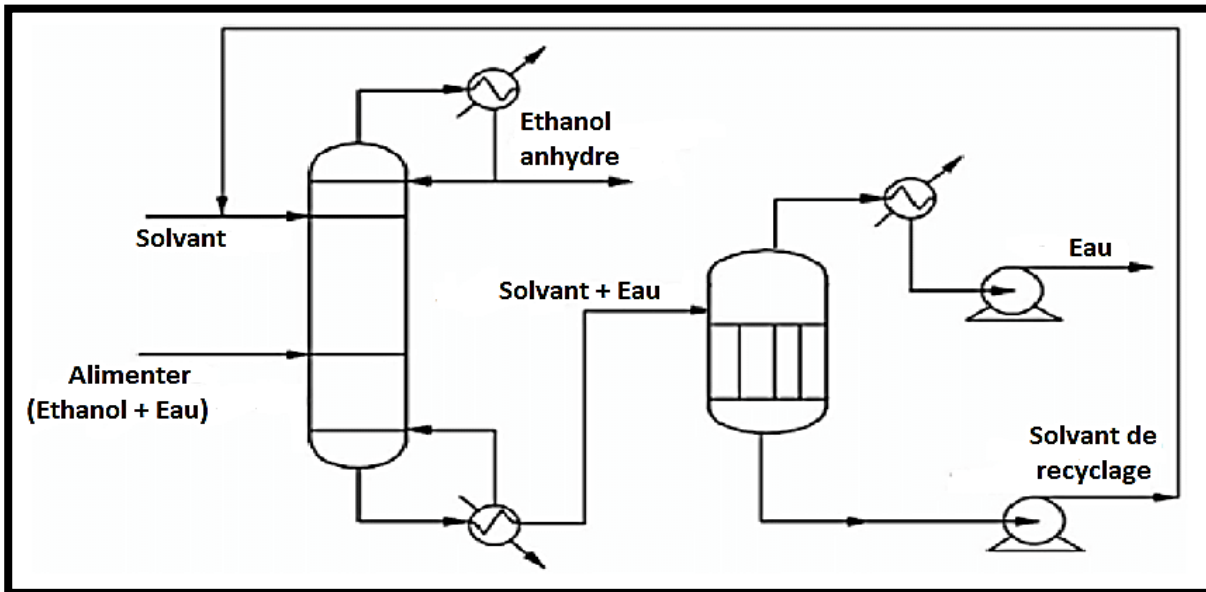


Figure 34. Le processus de la distillation extractive pour la déshydratation de l'éthanol (Lee *et al.*, 2021).

4.4. La séparation sur tamis moléculaire

Le procédé qui s'impose de plus en plus est la séparation sur tamis moléculaire (Boucher, 2014). Le principe du tamis moléculaire repose sur la différence de la taille moléculaire entre l'eau et l'éthanol (Amornraksa *et al.*, 2020). Il s'agit d'un tamis, dans les pores ont un diamètre nominal de 0.30 nm. Les petites molécules d'eau qui ont diamètre de 0.28 nm, peuvent traverser les pores sont adsorbées. Tandis que les plus grosses molécules d'éthanol, qui ont approximativement 0.44 nm de diamètre sont retenues par ce tamis (Figure 35) (Amornraksa *et al.*, 2020 ; Boucher, 2014).

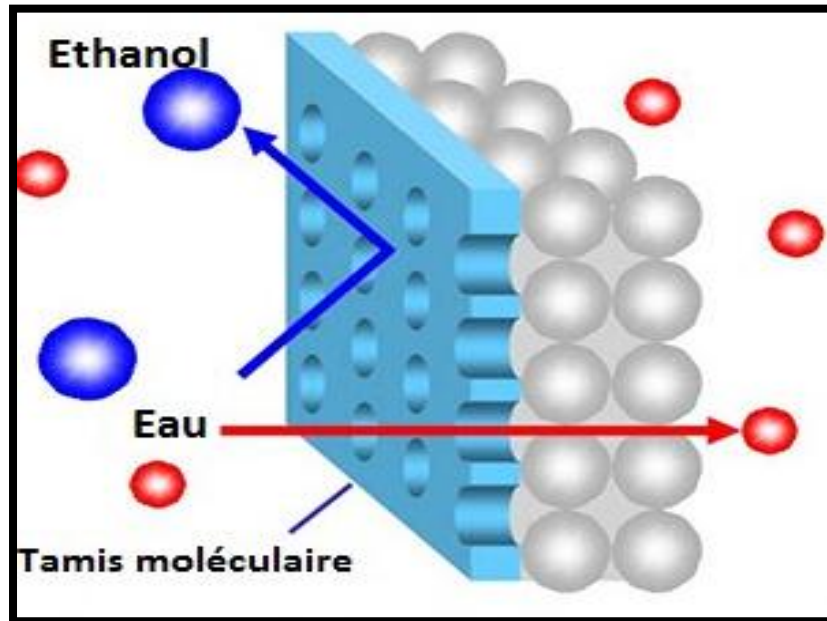


Figure 35. Principe de processus de la séparation sur tamis moléculaire (Net 12).

3.5. Pervaporation

La pervaporation est une sorte de processus de séparation membranaire. Principalement une alimentation liquide est séparée en deux flux, qui sont le perméat et le rétentat. L'eau traverse la membrane sous forme de perméat de vapeur, tandis que l'éthanol reste dans la phase liquide sous forme de rétentat. La force motrice de la pervaporation est une différence de pression créée sur la membrane. Le vide est situé du côté du perméat tandis que la pression atmosphérique est actionnée du côté de l'alimentation, provoquant la différence de pression (Figure 36) (Amornraksa *et al.*, 2020).

L'utilisation de la membrane de « zéolithe de sodium A » est un bon choix pour la séparation eau-éthanol, car l'eau peut plus facilement traverser la membrane et aller du côté du perméat en raison de l'hydrophilie de la membrane, ce qui entraîne une plus grande pureté de l'éthanol dans le rétentat côté. Cette technique peut surmonter le problème de composition azéotrope rencontré dans le processus de distillation, en plus elle consomme moins d'énergie et est plus respectueuse de l'environnement (Kunnakorn *et al.*, 2013).

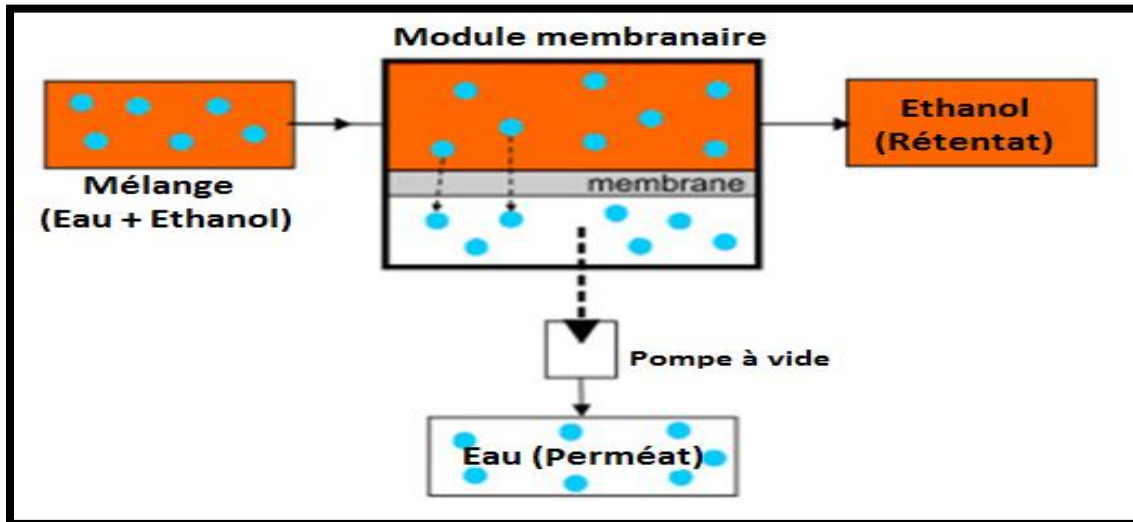


Figure 36. Schéma du principe du processus de la pervaporation (Manshad *et al.*, 2016).

Chapitre IV

Intérêt du bioéthanol

1. Avantages et inconvénients du bioéthanol

Le bioéthanol présente de nombreux avantages et inconvénients comme il est indiqué dans le Tableau (17).

Tableau 17. Avantages et inconvénients du bioéthanol (Net 13 ; Net 14 ; Net 15 ; Nichdemus, 2017 ; Riess, 2012).

Avantages	Inconvénients
Réduction de la dépendance étrangère à l'égard du carburant en réduisant la quantité totale de pétrole utilisée par substitution.	Biodiversité : une grande quantité de terres arables est nécessaire pour faire pousser des cultures. Cela pourrait voir certains habitats naturels détruits, y compris les forêts tropicales.
Utilisation flexible de 0 à 100%.	Au cours du processus de production du bioéthanol, une énorme quantité de dioxyde de carbone est libérée, ce qui rend son efficacité écologique proche de zéro.
Toute plante peut être utilisée pour la production de bioéthanol à condition qu'elle contienne du sucre et de l'amidon.	La production de bioéthanol exige de solides connaissances techniques pour une production efficace.
Le carburant à base d'éthanol comme E10 (10% d'éthanol et 90% d'essence) réduit les gaz à effet de serre jusqu'à 3.9%.	Il peut affecter négativement les pompes à carburant électriques en augmentant l'usure interne et la génération d'étincelles indésirables.
Il est neutre en carbone, c'est-à-dire que le dioxyde de carbone libéré dans le processus de production de bioéthanol est le même que celui que les cultures ont précédemment absorbé lors des photosynthèses.	Concurrence entre alimentation et énergie.
Etant un additif oxygénant, et peut remplacer les additifs nocifs pour la santé humaine.	Corrosion des pièces en contact avec l'éthanol.
Indice d'octane* élevé permettant une meilleure efficacité des moteurs à explosions.	Faible économie de carburant (c'est-à-dire que vous obtenez moins de kilomètres au gallon).
Il agit comme un antigel dans les moteurs, améliorant le démarrage des moteurs à froid et empêchant le gel.	L'éthanol pur est également difficile à vaporiser, ce qui peut rendre difficile le démarrage d'une voiture par temps froid.

Tableau 17. Avantages et inconvénients du bioéthanol (Net 13 ; Net 14 ; Net 15 ; Nichdemus, 2017 ; Riess, 2012) (La suite).

Avantages	Inconvénients
Il est neutre en Carbone, c'est-à-dire que le dioxyde de carbone libéré dans le processus de production de bioéthanol est le même que celui que les cultures ont précédemment absorbé lors des photosynthèses.	Concurrence entre alimentation et énergie.
Il provient de sources renouvelables et non de ressources finies.	Indice de cétane** faible ne permettant Pas son utilisation dans les moteurs à Combustion interne sans l'ajout d'un Accélérateur d'ignition.
Effet net d'utilisation se traduisant par une diminution globale de l'appauvrissement de la couche d'ozone dans l'atmosphère finie.	Il est assez coûteux de mettre en place un laboratoire de biocarburants.
Emissions de combustion moins dangereuse pour l'environnement.	Production de bioéthanol rempli l'air de gaz à effet de serre dans des quantités comparables aux émissions des moteurs à combustion interne.
Bilan énergétique positif selon le type de matière première, il peut varier de 1.24 à 8. La sortie d'énergie pendant la production est supérieure à l'entrée (controversé).	Contenu énergétique d'essence est bien plus supérieur à celui du bioéthanol. En d'autres termes, le bioéthanol n'est pas aussi efficace que le pétrole. Son contenu énergétique est de 70% de celui de l'essence.
Stimulation du milieu rural.	Phosphore et azote utilisés dans la production ont un effet négatif sur l'environnement.

2. Domaines d'utilisation du bioéthanol

Le bioéthanol a suscité beaucoup d'intérêt au cours des dernières décennies. Pendant ce temps, les boues d'épuration présentent un potentiel important dans le contexte des biocarburants, ce qui motive les décideurs politiques à commercialiser leur utilisation (**Rabbani et al., 2020**). Ceci est dû à ses multiples utilisations dans de nombreux domaines différents qui bénéficient à l'homme tels que : le domaine de transport, domaine chimique, pharmaceutique, médical, alimentaire, etc. (Figure 37).

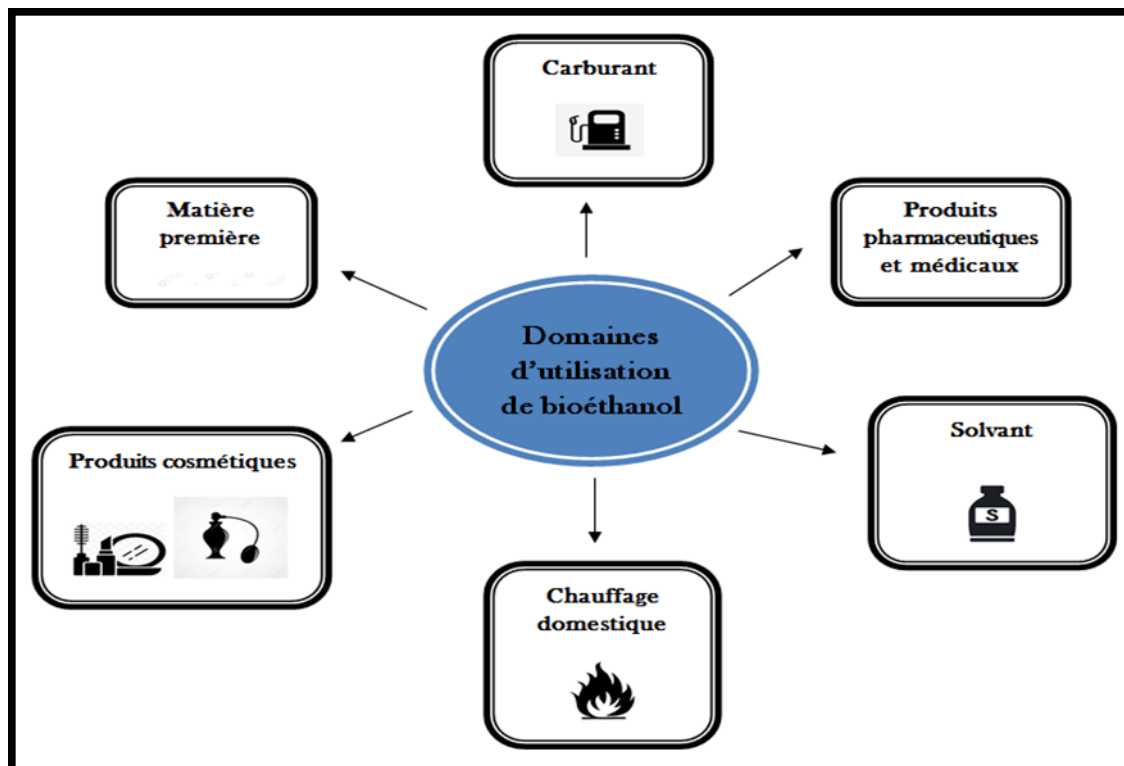


Figure 37. Les différents domaines d'utilisation du bioéthanol (Chilakamarry *et al.*, 2021).

2.1. Domaine de transport

Le bioéthanol peut être utilisé sous certaines conditions comme carburant dans les moteurs à essence ou sous de nombreuses formes (Escobar *et al.*, 2009). Par exemple, 5 à 10% d'éthanol sont ajoutés au diesel pour les moteurs diesel, 10 à 85 % d'éthanol est mélangé à l'essence pour les moteurs à combustion interne, et 1% à 100% d'éthanol est remplacé par l'essence pour le carburant flexible véhicules. Le nombre de véhicules poly-carburants sur les routes n'a cessé d'augmenter. Les mélanges les plus courants sont E85 (85% de bioéthanol, 15% d'essence), E20 (20% de bioéthanol, 80% d'essence) et E10 (10% de bioéthanol, 90% d'essence). Des mélanges avec une concentration en bioéthanol plus élevée sont utilisés dans les véhicules à carburant flexible (FFV : *Flexible Fuel Vehicles*) qui peuvent exploiter les mélanges jusqu'à 85 % de bioéthanol (E85). Le bioéthanol est transformé en éthyl tertio-butyl éther (ETBE) en mélange à 15% avec de l'essence (Chilakamarry *et al.*, 2021).

En Amérique latine, les ventes ont atteint 400 000 véhicules par an et environ 1 500 000 aux États-Unis. Pendant ce temps, l'Europe et la Suède ont enregistré 15 000 Véhicules alimentés à 85 % d'éthanol (E85) (Chilakamarry *et al.*, 2021).

2.2. Domaine chimique

De nombreux produits chimiques sont fabriqués dans l'industrie du bioéthanol et potentiellement bien plus dans l'industrie de l'éthanol de deuxième génération, répondant à une large gamme d'utilisations dans différents secteurs au niveau industriel, donc le marché potentiel du bioéthanol n'est pas juste limité au biocarburant pour le transport ou la production d'énergie mais possède aussi un potentiel de fourniture pour les industries chimiques (**RESTMAC, s.d**).

Parmi les produits chimiques, nous pouvons citer les suivants (**RESTMAC, s.d**) :

- ✓ Acétaldéhyde (matériel de base pour d'autres produits chimiques par exemple agents fixant pour les peintures et colorants) ;
- ✓ Acide Acétique (matière première pour les plastiques, agent blanchissant, conservateur) ;
- ✓ Ethylacetate (peinture, colorant, plastiques, adhésifs).

2.3. Domaine pharmaceutique

L'éthanol en différentes concentrations est largement utilisé dans l'industrie ou comme conservateur antimicrobien. L'éthanol améliore la pénétration trans-muqueuse des principes actifs, c'est pour cette raison qu'il est souvent utilisé dans les préparations pharmaceutiques pour la formulation des spécialités pharmaceutiques, presque dans toutes les formes galéniques, les injectables, les formes sèches et liquides orales, les formes liquides locales (gouttes), les formes pâteuses et les transdermes. Il est utilisé principalement comme solvant topiques, gels, pommades, crèmes, solutions dermiques, etc (Figure 38). Dans les formes sèches orales, l'éthanol est particulièrement utilisé comme agent de mouillage dans la granulation par voie humide ou comme agent d'enrobage des comprimés, il disparaît au cours du procédé de fabrication (**Khayati, 2014**).

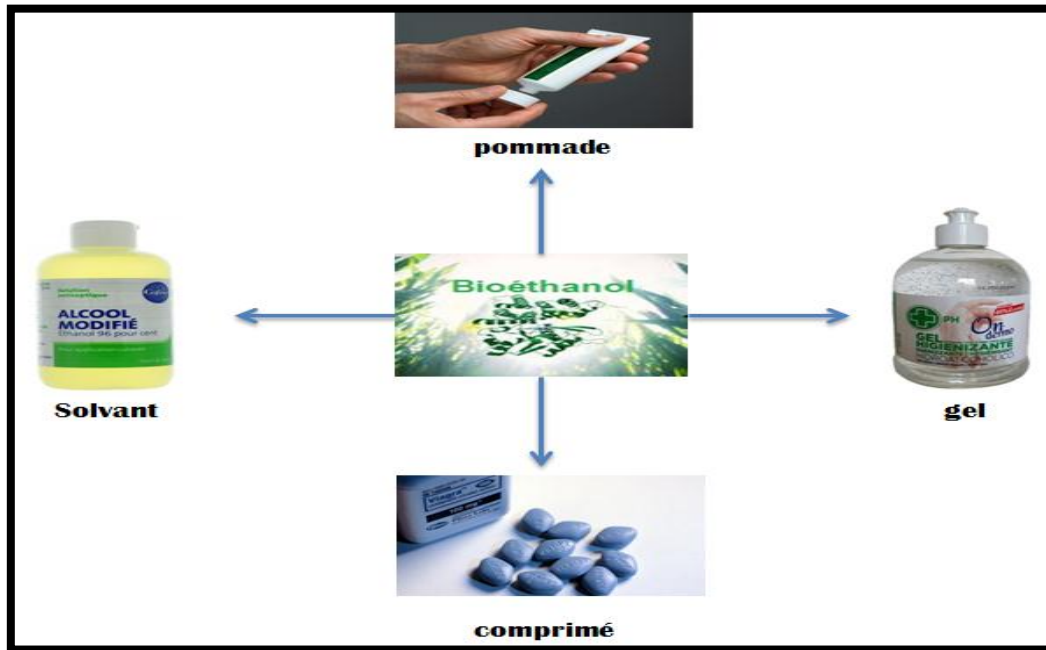


Figure 38. Les utilisations de bioéthanol dans le domaine pharmaceutique (Khayati, 2014).

2.4. Domaine alimentaire

Les utilisations du bioéthanol sont très étendues, y compris tous les aspects de la vie humaine, y compris l'alimentation. Ses usages dans l'industrie alimentaire s'appliquent surtout à la production des vinaigres et des boissons alcoolisées (Figure 39).

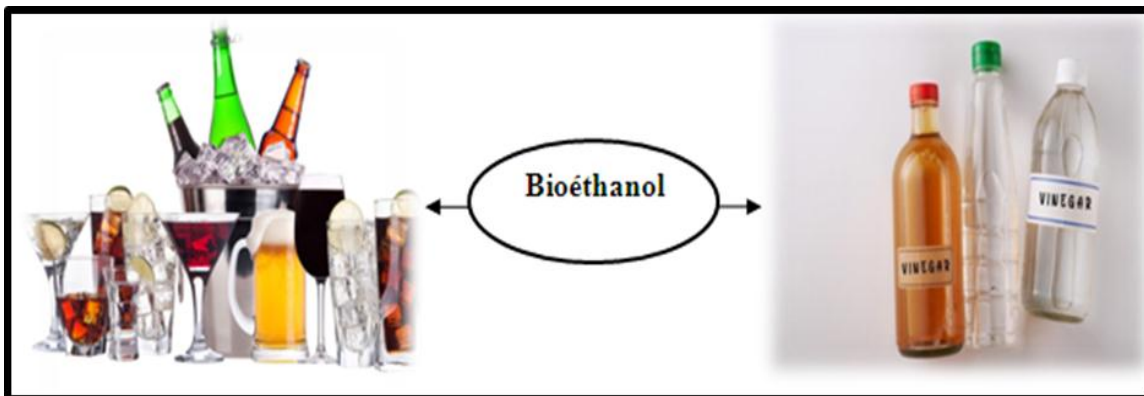


Figure 39. Les utilisations de bioéthanol dans le domaine alimentaire (Alzeer & Abou Hadeed, 2016).

2.4.1. Boissons alcoolisées

L'industrie des boissons est peut-être l'utilisateur final le plus connu d'éthanol renouvelable après le secteur des transports. Bien que toutes les boissons alcoolisées ne commencent pas avec des spiritueux neutres ou ne contiennent pas spiritueux neutre, il s'agit

d'une base intégrale pour certaines des boissons alcoolisées les plus populaires, notamment la bière et le vin, etc.

2.4.1.1. Bière

La bière est brassée à partir de céréales maltées, d'eau, de houblon et de levure. La fermentation pendant le processus de brassage génère de l'éthanol. Après la caféine, l'éthanol est la drogue récréative la plus couramment utilisée dans le monde et la consommation de bière est un moyen très populaire d'ingérer de l'éthanol. Bien qu'il existe des bières sans alcool, la teneur en éthanol de la bière varie généralement entre 3% et 9% d'alcool par volume. Cependant, la concentration d'éthanol dans certaines bières spécialisées peut être considérablement plus élevée (**Rajendram & Preedy, 2009**).

2.4.1.2. Vin

L'éthanol est l'alcool du vin (alcool éthylique). La concentration en éthanol d'un vin est exprimée de façon indirecte par le degré alcoolique qui signifie par le pourcentage d'alcool dans la bouteille. Sa teneur en éthanol varie de 9% à 15%. Il existe différents types de vin principalement le vin rouge, qui contient des quantités importantes de resvératrol, un antioxydant dérivé de la peau du raisin et qui semble avoir des propriétés anticancéreuses (**Alzeer & Abou Hadeed, 2016 ; Net 16**).

2.4.1.3. Spiritueux

Ces boissons contiennent entre 35% et 50% d'éthanol, bien que certaines atteignent des valeurs plus élevées, Il est obtenu par distillation les spiritueux comprennent le whisky, la vodka et la grappa Gin et tequila, entre autres. Il est principalement consommé en Asie et en Europe (**Alzeer & Abou Hadeed, 2016**).

2.4.2. Éthanol dans le vinaigre

Le vinaigre est décrit comme un liquide aigre et a été largement utilisé dans l'industrie alimentaire. Il est produit à partir de différents substrats naturels, comme les fruits avec un bon potentiel de fermentation. Pomme, raisins, dattes, miel, à peine et vin rouge sont fréquemment utilisés pour la production de vinaigre, qui est classiquement produit par deux procédés de fermentation, les glucides sont d'abord fermentés en alcool, puis l'éthanol est encore oxydé pour produire de l'acide acétique le taux de production d'acide acétique dépend de la température, de la disponibilité de l'oxygène, de la concentration d'éthanol et

concentration d'acide acétique le vinaigre est donc considéré comme une forme diluée de acide acétique. (Alzeer & Abou Hadeed, 2016).

2.5. Domaine cosmétique

En cosmétique, l'éthanol est utilisé pour sa grande volatilité (il disparaît immédiatement après application), ses propriétés asséchantes, rafraichissantes et antimicrobiennes. Il facilite la pénétration d'actifs dans les couches superficielles de la peau et favorisent le dépôt des ingrédients sur la peau ou le cheveu. Par exemple en maquillage, il améliore le dépôt de pigments des fonds de teint sur la peau. C'est un solubilisant très utile qui favorise la dissolution de certains ingrédients (Net 17). Dans les industries Parfum/Beauté, il est avant tout le solvant quasi universel des parfums, dans lesquels les compositions parfumantes sont soigneusement dissoutes et stabilisées. L'utilisation de l'alcool en parfumerie à la renaissance fera des progrès significatifs à cette industrie, soit dans la préparation des ingrédients de base (alcoolats et macéras) que des produits finis, la parfumerie alcoolique devenant la règle (Net 18). L'éthanol est utilisé également dans les industries de production des vernis, dissolvants, déodorants, eau de Cologne, etc (Figure 40). Elle considéré comme des solutions intéressantes à base d'alcool (Net 19).

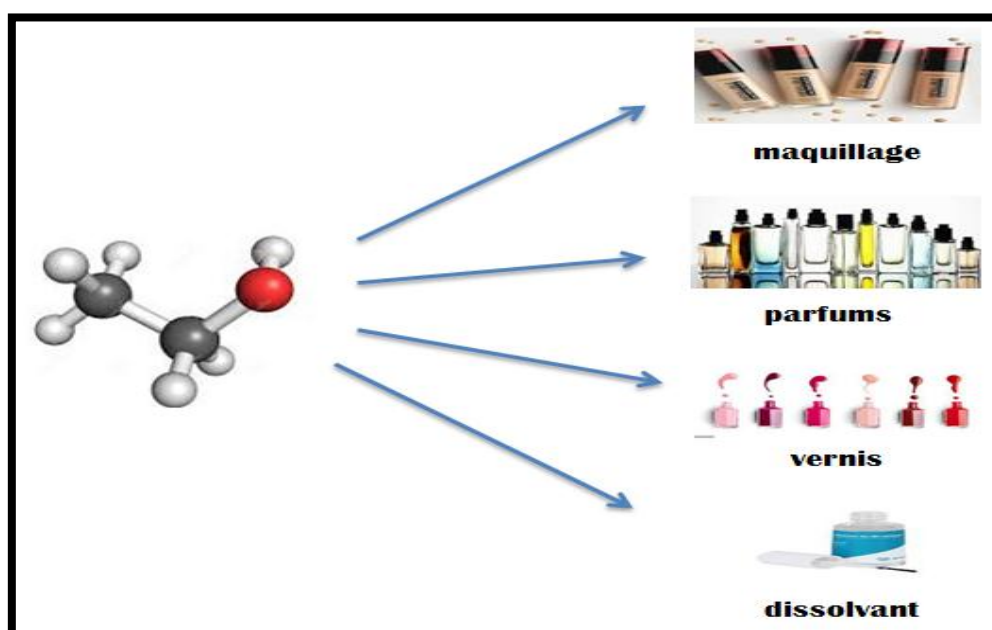


Figure 40. Les utilisations de bioéthanol dans le domaine cosmétique (Net 17 ; Net 19).

2.6. Domaine médicale

L'éthanol peut être utilisé comme intervention thérapeutique chez les patients empoisonnés au méthanol ou à l'éthylène glycol en raison de l'affinité beaucoup plus grande de l'éthanol pour les alcools déshydrogénases. Ces enzymes métabolisent le méthanol et l'éthylène glycol en sous-produits toxiques. Cependant, avec des taux sériques d'éthanol de 100mg/dl, des quantités minimales d'éthylène glycol ou de méthanol sont métabolisées par les alcools déshydrogénases. Les infusions d'éthanol ne sont pas utiles dans le traitement de l'empoisonnement à l'alcool isopropylique (**Dean & Lee, 2014**).

L'éthanol peut être administré par voie orale ou intraveineuse. L'éthanol IV présente les avantages d'atteindre rapidement des niveaux thérapeutiques, d'assurer une absorption complète, de limiter les risques d'aspiration et d'éviter la gastrite (**Dean & Lee, 2014**).

Dans ce domaine l'éthanol peut être utilisé aussi comme :

- ✓ **Antiseptique** : l'éthanol possède une activité désinfectante bactéricide majeure similaire à celle de la chlorhexidine, très efficace contre les bactéries Gram + et Gram -. En revanche, son action désinfectante est faible contre les virus et les champignons et sans activité désinfectante contre les bactéries sous forme sporulées. Cet effet désinfectant est obtenu à des concentrations comprises entre 60% et 95% v/v, avec une action optimale à 70% (**Khayati, 2014**).
- ✓ **Psychotrope** : l'éthanol est l'une des plus anciennes drogues récréatives, sous la forme de boisson alcoolisée (**Ghennam, s.d**).

2.7. Autres utilisations

L'éthanol peut se trouver aussi comme :

- ✓ **Chauffage domestique** : ces dernières années, une nouvelle forme de chauffage domestique est devenue populaire : le bioéthanol est utilisé pour alimenter les poêles et les cheminées (**Net 21**).
- ✓ **Matière première** : l'éthanol est un ingrédient industriel important. Il est largement utilisé comme précurseur d'autres composés organiques tels que les halogénures d'éthyle, les esters éthyliques, l'éther diéthylique, l'acide acétique et les éthylamines (**Net 22**).

- ✓ **Bioplastique** : le bioéthanol est un carburant bien servir dans la production du plastique. C'est la magie de la chimie : si l'on ôte une molécule d'eau de l'éthanol, on obtient de l'éthylène, qui est à la base de la fabrication de bien des produits, dont le polyéthylène, le plastique qui fait partie de nos vies quotidiennes (**Belboom *et al.*, 2016**).

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

Le présent travail présente une contribution à l'étude de la production de bioéthanol par la levure *Saccharomyces cerevisiae* à partir de la biomasse lignocellulosique. *S. cerevisiae* est la levure dominante dans le domaine industriel. Elle est le micro-organisme clé pour les procédés de fermentation alcoolique à cause de ses caractéristiques uniques de résistance et productivité élevée dans les industries de bioéthanol.

À l'heure actuelle, l'une des alternatives les plus prometteuses pour la convection l'essence est le bioéthanol, le plus grand biocarburant liquide produit au monde. Les principaux acteurs du marché du bioéthanol sont les États-Unis (54% de la production mondiale totale), le Brésil (environ 30%) et l'Union européenne (5%).

En outre, l'Afrique pourrait devenir dans un futur proche un gros producteur de bioéthanol à partir de canne à sucre, du sorgho à sucre et de la cassave ou du maïs. L'Algérie, possède un potentiel considérable en déchets et sous-produits de dattes. Ainsi, la production d'éthanol à partir des déchets de dattes constitue une solution intéressante sur le plan économique.

Le bioéthanol est principalement produit par fermentation microbienne de sucres ou d'amidon à partir de diverses matières premières, y compris la canne à sucre, les betteraves, le maïs, les céréales, les déchets agricoles, les déchets forestiers, etc. Le choix de ce type de matière première se fait en raison de leur prévisibilité, faisabilité et durabilité pour les carburants renouvelables.

La biomasse lignocellulosique est l'une des ressources organiques les plus abondantes au monde et constitue une source prometteuse des énergies renouvelables et des bioproduits. Sa composition typique et sa richesse en homopolysaccharides et hétéropolysaccharides (cellulose et hémicellulose), qui sont décomposés en sucres simples fermentescibles, en faire une matière première efficace pour la production de bioéthanol.

Le prétraitement de la biomasse lignocellulosique (prétraitement biologique, physique, chimique ou physico-chimique) a pour objectif l'augmentation de la surface de la biomasse, la perturbation de sa matrice et la dissolution de l'hémicellulose et/ou de la lignine, ainsi que la réduction de la taille des particules de la biomasse.

Par la suite, l'hydrolyse de la cellulose s'améliore en augmentant les accessibilités des acides (hydrolyse chimique) ou des enzymes (hydrolyse enzymatique) à la surface de la cellulose. Ceci implique une dépolymérisation supplémentaire de la cellulose et

l'hémicellulose en sucres simples fermentescibles, utilisés ensuite pour la fermentation alcoolique par la levure *S. cerevisiae*.

Le procédé d'extraction du bioéthanol vise à obtenir de l'éthanol anhydre pur (100%) par différentes techniques modernes de distillation azéotropique, extractive, la séparation sur tamis moléculaire et la pervaporation.

L'importance de bioéthanol résulte en de nombreuses applications industrielles dans divers domaines, principalement le domaine de transport dont les mélanges les plus courants sont E85 (85% de bioéthanol, 15% d'essence), E20 et E10. Le bioéthanol trouve également des applications dans le domaine médical, pharmaceutique et cosmétique. En plus, il peut être utilisé comme un solvant, une matière première industrielle et dans le chauffage domestique.

Ce travail de mémoire ouvre des perspectives :

- ✓ Isolement des souches de l'espèce *S. cerevisiae* pour les procédés biotechnologiques de production de bioéthanol.
- ✓ Valorisation de biomasses lignocellulosiques disponibles en Algérie, tels que les déchets de dattes, les déchets d'agrumes, etc. par la production de bioéthanol par *S. cerevisiae*.
- ✓ Optimisation des méthodes de production de bioéthanol.
- ✓ Purification et caractérisation de bioéthanol produit pour destiner aux utilisations industrielles.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

« A »

Abo, B. O., Gao, M., Wang, Y., Wu, C., Ma, H., & Wang, Q. (2019). Lignocellulosic biomass for bioethanol: an overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation processes. *Reviews on environmental health*, 34(1), 57-68. <https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0054>

Aditiya, H. B., Mahlia, T. M. I., Chong, W. T., Nur, H., & Sebayang, A. H. (2016). Second generation bioethanol production: A critical review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 66, 631-653. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.015>

Akbar, D., Subedi, R., Rolfe, J., Ashwath, N., & Rahman, A. (2019). Reviewing commercial prospects of bioethanol as a renewable source of future energy—an Australian perspective. In *Advances in eco-fuels for a sustainable environment* (pp. 441-458). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102728-8.00016-4>

Alio, M.A. (2020). Production de bioéthanol à partir d'une biomasse lignocellulosique multiresources locale par prétraitement Organosolv et hydrolyse enzymatique. Thèse de doctorat en Génie des procédés, Université Clermont Auvergne, France.

Alsif, A.S. (2010). Le Brésil et les biocarburants, l'internationalisation d'un enjeu énergétique par le Sud. (Axe IX, Symposium 33). Thèse de doctorat en prévision économiques, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales (EHESS), Toulouse.

Alzeer, J., & Abou Hadeed, K. (2016). Ethanol and its Halal status in food industries. *Trends in Food Science & Technology*, 58, 14-20. <https://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2016.10.018>

Amamria, A., & Abed, C. (2018). Etude de la formation de biofilm chez *Saccharomyces cerevisiae*. Mémoire de master en Mycologie et Biotechnologie Fongique, Université des Frères Mentouri Constantine, Constantine.

Amillastre, E. (2012). Amélioration de la robustesse de souches de levures aux stress technologiques par une stratégie de génie microbiologique. Application à la production industrielle de bio-éthanol à partir de matières agricoles. Thèse de doctorat en Ingénieries Enzymatique et Microbienne, Université de Toulouse, Toulouse.

Amornraksa, S., Subsaipin, I., Simasatitkul, L., & Assabumrungrat, S. (2020).

Systematic design of separation process for bioethanol production from corn stover. *BMC Chemical Engineering*, 2(1), 1-16. <https://doi.org/10.1186/s4280-020-00033-1>

Antoine, O., Copinschi, P., Hafner, M., Laboué, P. (2021). *Perspectives d'évolution de biocarburants : Jeux des acteurs et enjeux fonciers.*

Arlt, W. (2014). Azeotropic distillation. In *Distillation* (pp. 247-259). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386878-7.00007-3>

Azhar, S. H. M., Abdulla, R., Jambo, S. A., Marbawi, H., Gansau, J. A., Faik, A. A. M., & Rodrigues, K. F. (2017). Yeasts in sustainable bioethanol production: A review. *Biochemistry and biophysics reports*, 10, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2017.03.003>

« B »

Bacha, A. (2008). Production et étude de l'activité de l'invertase produite par la levure *Saccharomyces cerevisiae* sur substrat à base de datte. Mémoire de magister en Technologie alimentaire, Université el hadj lakhdar, Batna.

Baena, L. M., Vásquez, F. A., & Calderón, J. A. (2021). Corrosion assessment of metals in bioethanol-gasoline blends using electrochemical impedance spectroscopy. *Heliyon*, 7(7), e07585. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07585>

Belboom, S., & Leouard, A. (2016). Does biobased polymer achieve better environmental impacts than fossil polymer ? Comparison of fossil HDPE and biobased HDPE produced from sugar beet and wheat. *Biomass and bioenergy*, 85, 159-167.

Bendriss, A. (2021). Contribution à l'étude de l'influence des biocarburants et de leurs propriétés sur le fonctionnement des moteurs à combustion interne. Thèse de doctorat en Génie Mécanique, Université Djillali Liabes, Sidi bel-Abbes.

Bakare, V & Benjamin, B. (2020). *Saccharomyces cerevisiae* Bio-Ethanol Production as an Alternative Source of Sustainable Energy. *International Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*, 7(6), 190-194. <https://doi.org/10.31033/ijrasb.7.6.27>

Berber, N. (2017). Caractérisation biomoléculaire et biotechnologique des souches de « *Saccharomyces cerevisiae* » issues des cépages Algériens. Thèse de doctorat en Sciences et Technologies Alimentaires, Université abdelhamid ibn badis, Motaganem.

Berna, H. (2009). Transestérification des huiles végétales par l'éthanol en conditions douces par catalyses hétérogènes acide et basique. Thèse de doctorat, l'Institut de Recherche sur la Catalyse et l'environnement, Université Claude Bernard Lyon 1, Lyon.

Bernstein, H., & Bernstein, C. (2019). Sexual Processes in Microbial Eukaryotes. In *Parasitology and Microbiology Research*. IntechOpen.

Bichot, A., Delgenès, J. P., Méchin, V., Carrère, H., Bernet, N., & García-Bernet, D. (2018). Understanding biomass recalcitrance in grasses for their efficient utilization as biorefinery feedstock. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 17(4), 707-748. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9485-y>

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

Boulal, A., Benbrahim, Z., Benali, B., & Ladjel, S. (2013). Etude comparative de rendement de la production d'éthanol de deux variétés de dattes communes de faible valeur commerciale (Tinaceur et Aghmou) de Sud-Ouest de l'Algérie. *Journal of Renewable Energies*, 16(3), 539-550. <https://doi.org/10.54966/jreen.v16i3.398>

Boulal, A., Kihal, M., Khelifi, C., & Benali, B. (2017). Generation of bioethanol from common date byproducts, "Teggaza and Lebghel" in Southern Algeria. *African Journal of Biotechnology*, 16(1), 41-50. <https://doi.org/10.5897/AJB2016.15369>

Burillard, L., Daumas, V., Glaz., M., Kouyoumdjian, L., Lobrot, S., Logier, D., Mallot, N., Marchand, C. (2016). Mais c'est quoi la fermentation ?. Université de Lorraine, Lorraine. En ligne https://ensaia.univ-lorraine.fr/sites/ensaia.univ-lorraine.fr/files/users/telechargements/rapport_final_fermentation2.pdf, consulté le 15/04/2022.

« C »

Cai, J., He, Y., Yu, X., Banks, S. W., Yang, Y., Zhang, X., & Bridgwater, A. V., et al. (2017). Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. *Renewable and sustainable energy reviews*, 76, 309-322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.072>

Celton, M. (2011). Etude de la réponse de *Saccharomyces cerevisiae* à une perturbation NADPH par une approche de biologie des systèmes. Thèse de doctorat en Biotechnologie, Microbiologie, Centre international d'études supérieures en sciences agronomiques de Montpellier SupAgro, Montpellier.

Chabenne, H., Hassouna, M., Amrane, A., & Djelal, H. (2012). Influence de la nature de la source d'azote sur la production de bioéthanol à partir de déchets de dattes par *saccharomyces cerevisiae*.

Chacón-Navarrete, H., Martín, C., & Moreno-García, J. (2021). Yeast immobilization systems for second-generation ethanol production: actual trends and future perspectives. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 15(5), 1549-1565. <https://doi.org/10.1002/bbb.2250>

Chaib, H. (2011). Etudes et conception d'une bioraffinerie pour la production des biocarburants de seconde génération. Mémoire de magister en Génie des procédés, Université Kasdi Merbah Ouargla, Ouargla.

Chilakamarry, C. R., Sakinah, A. M., Zularisam, A. W., Pandey, A., & Vo, D. V. N. (2021). Technological perspectives for utilisation of waste glycerol for the production of biofuels: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101902. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101902>

Chniti, S. (2015). Optimisation de la bioproduction d'éthanol par valorisation des refus de l'industrie de conditionnement des dattes. Thèse de doctorat en Chimie, Université de Rennes 1, Rennes.

Choi, K. R., Jiao, S., & Lee, S. Y. (2020). Metabolic engineering strategies toward production of biofuels. *Current Opinion in Chemical Biology*, 59, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2020.02.009>

Criscuoli, A. (2016). Azeotropic distillation. In : Drioli E., Giorno L. (eds) Encyclopedia of membranes. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40872-4_40-3

« D »

De Bhowmick, G., Sarmah, A. K., & Sen, R. (2018). Lignocellulosic biorefinery as a model for sustainable development of biofuels and value added products. *Bioresource technology*, 247, 1144-1154. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.163>

Dean, A., & Lee, D. (2014). Bedside laboratory and microbiologic procedures : Chapter 67. In Roberts and Hedges (Eds) *Clinical procedures in Emergency Medicine*, 6th (pp 1395-1422). Philadelphia, PA : Saunders.

Debboub, A. (2012). Hydrolyse enzymatique de la biomasse lignocellulosique : nouvelle technologie de prétraitement et de catalyse. Mémoire master recherche, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières.

« E »

Eloutassi, N., Louaste, B., Boudine, L., & Remmal, A. (2014). Valorisation de la biomasse lignocellulosique pour la production de bioéthanol de deuxième génération. *Journal of Renewable Energies*, 17(4), 600-609. <https://doi.org/10.54966/jreen.v17i4.473>

Escobar, J. C., Lora, E. S., Venturini, O. J., Yáñez, E. E., Castillo, E. F., & Almazan, O. (2009). Biofuels: environment, technology and food security. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(6-7), 1275-1287. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.014>

« F »

Falcy, M., Jargot, D., Miraval, S., Pasquier, E., Pilière, F., Robert, S. (2019). *Éthanol* : Fiche toxicologique n°48. INRS.

Fennouche, I. (2017). Production de bioéthanol à partir de résidus d'agriculture. Mémoire de Master en Génie des Procédés, Université Badji Mokhtar, Annaba.

Flores, C. L., & Gancedo, C. (2018). Construction and characterization of a *Saccharomyces cerevisiae* strain able to grow on glucosamine as sole carbon and nitrogen source. *Scientific reports*, 8(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35045-8>

Fong Lopez, M. (2019). Développement d'un procédé de dégradation enzymatique de la biomasse lignocellulosique mettant en œuvre des moyens thermo-mécano-chimiques. Thèse de doctorat en Chimie Biologie Sante, L'université de Toulouse, Toulouse.

« G »

Gares, M., Hiligsmann, S., & Kacem Chaouche, N. (2020). Lignocellulosic biomass and industrial bioprocesses for the production of second generation bio-ethanol, does it have a future in Algeria?. *SN Applied Sciences*, 2(10), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03442-2>

Ghennam. *Intoxication éthylique.* Hôpital militaire régional universitaire de Constantine, Constantine. http://univ.ency-education.com/uploads/1/3/1/0/13102001/legal6an-intoxication_alcool2021ghennam.

Guiraud, J., Galzy, P. (1998). Microbiologie alimentaire. Ed. Dunod. Paris. 615 P.

Guiraud, J.P. (1998). *Microbiologie alimentaire.* Paris : Dunod. 310-321p.

« H »

Hajilary, N., Rezakazemi, M., & Shirazian, S. (2019). Biofuel types and membrane separation. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0777-9>

Hussenet, C. (2017). Instrumentation, modélisation et automatisation de fermenteurs levuriers à destination œnologique. Thèse de doctorat en Génie des procédés, Université Paris-Saclay, Paris.

« I »

Institut de Coopération au Développement Economique et Social. s.d. *Les biocarburants en Afrique.* ICDES, France.

IRENNA. (2015). REmap 2030 a Renewable Energy Roadmap.

IRENA. (2016). Bioéthanol in Africa: The case for technology transfer and South-South co-operation, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

« J »

Jambo, S. A., Abdulla, R., Azhar, S. H. M., Marbawi, H., Gansau, J. A., & Ravindra, P. (2016). A review on third generation bioethanol feedstock. *Renewable and sustainable energy reviews*, 65, 756-769. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.064>

Johnson, E. A., & Echavarri-Erasun, C. (2011). Yeast biotechnology. In *The yeasts* (pp. 21-44). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52149-1.00003-3>

Joseph, R., & Bachhawat A.K. (2014). Yeasts: production and commercial uses. Oxford : Encyclopedia of Food Microbiology (Second Edition) Academic Press. 823-830p.

« K »

Keera, S. T., El Sabagh, S. M., & Taman, A. R. (2018). Castor oil biodiesel production and optimization. *Egyptian journal of petroleum*, 27(4), 979-984. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.02.007>

Khayati, Y. (2014). *L'éthanol, sa qualité et ses utilisations en pharmacie*. Spécialités sous la loupe. Université Hassan II, Casablanca.

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 en Génie de procédés, l'Université Bretagne Loire, France.

Khoshkho, S. M., Mahdavian, M., Karimi, F., Karimi-Maleh, H., & Razaghi, P. (2022). Production of bioethanol from carrot pulp in the presence of *Saccharomyces cerevisiae* and beet molasses inoculum; a biomass based investigation. *Chemosphere*, 286, 131688. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131688>

Kumar, B., Bhardwaj, N., Agrawal, K., & Verma, P. (2020). Bioethanol production: generation-based comparative status measurements. In *Biofuel production technologies: critical analysis for sustainability* (pp. 155-201). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8637-4_7

Kunnakorn, D., Rirksoomboon, T., Siemanond, K., Aungkavattana, P., Kuanchertchoo, N., Chuntanalerg, P., & Wongkasemjit, S., et al. (2013). Techno-economic comparison of energy usage between azeotropic distillation and hybrid system for water–ethanol separation. *Renewable energy*, 51, 310-316. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.09.055>

« L »

Lakatos, G. E., Ranglová, K., Manoel, J. C., Grivalský, T., Kopecký, J., & Masojídek, J. (2019). Bioethanol production from microalgae polysaccharides. *Folia microbiologica*, 64(5), 627-644. <https://doi.org/10.1007/s12223-019-00732-0>

Larpent, J.P. (1991). *Biotechnologie des levures* (Ed). Paris : Masson. 426 p.

Larpent, J.P., & Larpent Gourgoud, M. (1985). Elément de microbiologie. Paris : Hermann. 464 p.

LaRue, T. A., & Spencer, J. F. T. (1967). The utilization of imidazoles by yeasts. *Canadian Journal of Microbiology*, 13(7), 789-794. <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/m67-104>

Lee, Y. H., Chen, C. H., Fazara, M. U., & Hatim, M. M. I. (2021). Production of fuel grade anhydrous ethanol: a review. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 765, No. 1, p. 012016). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/765/1/012016>

« M »

Maican, E., Coz, A., & Ferdeş, M. (2015). Continuous Pretreatment Process for Bioethanol Production. In *4th International Conference on Thermal Equipment, Renewable Energy and Rural Development. Romania* (Vol. 35, p. 287).

Manshad, S., Nawawi, M. G. M., Sazegar, M. R., Hassan, H. B., & Alamaria, A. M. (2016). Membranes with favorable chemical materials for pervaporation process: A review. *J. Membr. Sci. Technol*, 6, 164. <https://doi.org/10.4172/2155-9589.1000164>

Martin, C. P., & Siebert, K. J. (1992). Evaluation of multinitrogen source media for wild yeast detection in brewing culture yeast. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 50(4), 134-138. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9333464>

Mathew, G. M., Raina, D., Narisetty, V., Kumar, V., Saran, S., Pugazhendi, A., & Binod, P., et al. (2021). Recent advances in biodiesel production: Challenges and solutions. *Science of The Total Environment*, 794, 148751. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148751>

Mertens L, Roiz J, (2010). *Les biocarburants non conventionnels* : quelles opportunités pour La Belgique en 2020. Secrétariat ValBiom - Chaussée de Namur, 146-5030 Gembloux.

« N »

Nguyen, TD. (2016). Protection de la levure *Saccharomyces cerevisiae* par un système biopolymérique multicouche : effet sur son activité métabolique en réponse aux conditions de l'environnement. Thèse de doctorat en Microbiologie et Parasitologie, Université de Bourgogne, AgroSup Dijon.

Nichdemus, C. O. (2017). Bioethanol : Production, Avantages, Disavantage and Environmetal Impact. Environmetal-biotechnology. En ligne <https://www.biotecharticles.com/Environmental-Biotechnology-Article/Bioethanol-Production-Advantages-Disadvantages-And-Environmental-Impacts-3816.html>

Niju, S., Swathika, M., & Balajii, M. (2020). Pretreatment of lignocellulosic sugarcane leaves and tops for bioethanol production. In *Lignocellulosic biomass to liquid biofuels* (pp. 301-324). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815936-1.00010-1>

« O »

Oteng-Gyang, K. (1984). *Introduction à la microbiologie alimentaire dans les pays chauds*. Paris : Technique et Documentation Lavoisier. 260p.

Ould el hadj, M., Cheick, M., hamdi, W., Sayah, Z., & Bouaziz, S. (2012). Étude comparative de la production d'éthanol brut à partir de trois variétés de dattes communes (dégela Beida, tacherwit et hamraya) réparties dans les différentes classes de dattes (molle, demi-molle et sèche) de la cuvette de Ouargla (Sahara septentrional est algérien). *revue Algerian journal of arid environment*, 2(2), 10-10.

« P »

Parapouli, M., Vasileiadis, A., Afendra, A. S ., & Hatziloukas, E. (2020). *Saccharomyces cerevisiae* and its industrial applications. *AIMS Microbiology*, 6 (1), 1-31 [10.3934/microbiol.2020001](https://doi.org/10.3934/microbiol.2020001)

Parisé, L. (2005). Identification d'un substrat naturel de l'endoprotéase yapsine 1 de *Saccharomyces cerevisiae*. Mémoire de maîtrise en microbiologie, Université Laval, Québec.

Passicouset, J. (2019). Descripteurs physico-chimiques de la biomasse lignocellulosique en hydrolyse enzymatique : vers une caractérisation in-situ. Thèse de doctorat en Chimie-Physique, Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France, Solaize.

Periyasamy, K. (2018). Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass using Immobilized Cellulolytic Enzymes. Thèse de doctorat en Mécanique des fluides, procédés, énergétique, Anna University, Inde.

5Peskett, L., Slater, R., Stevens, C., & Dufey, A. (2007). Biofuels, agriculture and poverty reduction. *Natural resource perspectives*, 107, 1-6. <https://www.researchgate.net/publication/42765077>

Phaff, H.G., Miller, M.W., & Mrak, E.K. (1968). The life of yeasts. In: Oteng-Gyang K. Introduction à la microbiologie alimentaire dans les pays chauds. *Technique & Documentation Lavoisier*, Paris. 8; 43p.

Prabhu, G., Bhat, D., Bhat, R. M., & Selvaraj, S. (2022). A Critical Look at Bioproducts Co-cultured Under Solid State Fermentation and Their Challenges and Industrial Applications. *Waste and Biomass Valorization*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01721-0>

Pretorius, I. S. (2017). Synthetic genome engineering forging new frontiers for wine yeast. *Critical reviews in biotechnology*, 37(1), 112-136
<https://doi.org/10.1080/07388551.2016.1214945>

« R »

Rabbani, M., Momen, S., Akbarian-Saravi, N., Farrokhi-Asl, H., & Ghelichi, Z. (2020). Optimal design for sustainable bioethanol supply chain considering the bioethanol production strategies: A case study. *Computers & Chemical Engineering*, 134, 44p
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106720>

Rajendram, R., & Preedy, V. R. (2009). Ethanol in beer: production, absorption and metabolism. In *Beer in health and disease prevention* (pp. 431-440). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373891-2.00041-9>

Rebiere, J. (2017). Nouvelle méthodologie pour la caractérisation des distributions de masses molaires d'échantillons cellulosiques complexes. Thèse de doctorat en Sciences des agroressources, Fédérale de Toulouse, Toulouse.

RESTOMAC. s.d. Production et utilisation du Bioéthanol. La commission Européenne-FP6.

Rezania, S., Oryani, B., Cho, J., Talaiekhosani, A., Sabbagh, F., Hashemi, B., & Mohammadi, A. A., et al. (2020). Different pretreatment technologies of lignocellulosic biomass for bioethanol production: an overview. *Energy*, 199, 117457.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117457>

Rezki-Bekki, M.A. (2014). Production de métabolites par les levures : caractérisation et identification des arômes et alcools. Thèse de doctorat en Biotechnologie, Université d'Oran, Oran.

Richel, A. (2012). La lignine, une molécule d'intérêt issue du bioraffinage. *Chimie Nouvelle*, 111, 18-22.

Riess, J. (2012). Intensification de la brique « fermentation alcoolique » de substrats betteraviers pour la production d'éthanol. Thèse de doctorat en Génie des procédés, L'université de Toulouse, Toulouse.

Ruiz Bailon, M. (2018). Traitement physique et catalytique des vapeurs de Pyrolyse Flash : vers une double valorisation matière-énergie. Thèse de doctorat en Génie des procédés, Université de Montpellier, Montpellier.

« S »

Saidi, A. (2011). La biomasse lignocellulosique et la bioénergie. *Bio énergie environnement*, 4-5.

Saldarriaga-Hernández, S., Velasco-Ayala, C., Flores, P. L. I., de Jesús Rostro-Alanis, M., Parra-Saldivar, R., Iqbal, H. M., & Carrillo-Nieves, D. (2020). Biotransformation of lignocellulosic biomass into industrially relevant products with the aid of fungi-derived lignocellulolytic enzymes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 161, 1099-1116. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.047>

Saoud, M. Z., Rhatous, M., El Mire, S., Lyagoubi, M., & Aoufi, S. (2017). *Saccharomyces cerevisiae*, une levure de plus en plus impliquée dans les infections urinaires: à propos de 3 cas. *Journal de Mycologie Médicale*, 27(3), e31-e32. <https://www.researchgate.net/publication/319928131>

Sarkar, N., Ghosh, S. K., Bannerjee, S., & Aikat, K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: an overview. *Renewable energy*, 37(1), 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.045>

Seyidoglu, N., & Aydin, C. (2021). *Saccharomyces*: Is a Necessary Organism or a Biological Warrior?. In *Saccharomyces*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.96029>

Sharma, A., & Aggarwal, N. K. (2020). Water Hyacinth: A Potential Lignocellulosic Biomass for Bioethanol. Haryana: Springer International Publishing. 106 p.

Shitole, S., Shinde, S., Waghmare, S., & Kamble, H. (2022). A Review On: Preservatives Used in Pharmaceuticals and Impacts on Health.

Siverio, J. M. (2002). Assimilation of nitrate by yeasts. *FEMS Microbiology Reviews*, 26(3), 277-284. <https://academic.oup.com/femsre/article-abstract/26/3/277/497414>

Stickel, J. J., Elander, R. T., Mcmillan, J. D., & Brunecky, R. (2014). Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass. *Bioprocessing of renewable resources to commodity bioproducts*, 77-103. <https://doi.org/10.1002/9781118845394.ch4>

Sudarsanam, P., Zhong, R., Van den Bosch, S., Coman, S. M., Parvulescu, V. I., & Sels, B. F. (2018). Functionalised heterogeneous catalysts for sustainable biomass valorisation. *Chemical Society Reviews*, 47(22), 8349-8402. <https://doi.org/10.1039/C8CS00410B>

Susmozas, A., Martín-Sampedro, R., Ibarra, D., Eugenio, M. E., Iglesias, R., & Manzanares, P., Moreno, A. D. (2020). Process strategies for the transition of 1G to advanced bioethanol production. *Processes*, 8(10), 1310. <https://doi.org/10.3390/pr8101310>

« T »

Tayyab, M., Noman, A., Islam, W., Waheed, S., Arafat, Y., & Ali, F., Lin, W., et al. (2018). Bioethanol production from lignocellulosic biomass by environment-friendly pretreatment methods: A review. *Appl. Ecol. Environ. Res*, 16(1), 225-249. https://dx.doi.org/10.15666/aeer/1601_225249

Tse, T. J., Wiens, D. J., & Reaney, M. J. (2021). Production of bioethanol—A review of factors affecting ethanol yield. *Fermentation*, 7(4), 268. <https://doi.org/10.3390/fermentation7040268>

Türker, M. (2014). Yeast biotechnology: Diversity and applications. In *Proceedings of 27th VH Yeast Conference* (pp. 1-26).

« V »

Vaitilingom, G., Mouloungui, Z., Benoist, A., Broust, F., Daho, T., & Piriou, B. (2021). Vers une génération plus "verte" de biodiesels. *OCL* (vol. 28).

Verardi, A., De Bari, I., Ricca, E., & Calabrò, V. (2012). Hydrolysis of lignocellulosic biomass: current status of processes and technologies and future perspectives. In *Bioethanol* (Vol. 2012, pp. 95-122). Rijeka: InTech. <https://doi.org/10.5772/23987>

« W »

Walker, G. M., & White, N. A. (2017). Introduction to fungal physiology. *Fungi: biology and applications* (pp 1-35). Kildare : Kevin Kavanagh.

Walker, R. S., & Pretorius, I. S. (2018). Applications of yeast synthetic biology geared towards the production of biopharmaceuticals. *Genes*, 9(7), 340. <https://doi.org/10.3390/genes9070340>

Wertz, J. (2016). Prétraitements de la biomasse lignocellulosique. *ValBiom.*, 1-58.
Willaert, R.G. (2017). Yeast Biotechnology. *Fermentation*, 3(1), 6
<https://doi.org/10.3390/fermentation3010006>

Willaert, R.G. (2017). Yeast Biotechnology. *Fermentation*, 3(1), 6
<https://doi.org/10.3390/fermentation3010006>

Woiciechowski, A. L., Neto, C. J. D., de Souza Vandenberghe, L. P., de Carvalho Neto, D. P., Sydney, A. C. N., & Letti, L. A. J., Soccol, C. R., et al. (2020). Lignocellulosic biomass: Acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance—Conventional processing and recent advances. *Bioresource technology*, 304, 122848. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122848>

« Z »

Zabed, H., Sahu, J. N., Suely, A., Boyce, A. N., & Faruq, G. (2017). Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 475-501. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.076>

Zentou, H., Abidin, Z. Z., Yunus, R., Awang Biak, D. R., & Korelskiy, D. (2019). Overview of alternative ethanol removal techniques for enhancing bioethanol recovery from fermentation broth. *Processes*, 7(7), 458. <https://doi.org/10.3390/pr7070458>

Zergane, H. (2021). Elaboration et caractérisation d'un Biomatériau Composite (PMMA+ biopolymère et nano renfort naturel) destiné aux prothèses Dentaires. Thèse de doctorat en Génie des Matériaux, Université Houari Boumediene, Alger.

Sites web :

Net 01: Lesaffre. (2020). A la rencontre de *saccharomyces cerevisiae*. En ligne <https://www.lesaffre.com/fr/trends-mag/a-la-rencontre-de-saccharomyces-cerevisiae/>, consultée le 06/04/2022.

Net 02: Studios Guy. *Saccharomyces cerevisiae* in biological research and its applications. En ligne <https://studiousguy.com/saccharomyces-cerevisiae-applications/>, consulté le 07/04/2022.

Net 03: Aurel Automobile. (2021). La filière éthanol bio en France. En ligne <https://www.aurel-automobile.fr/fr/la-filiere-ethanol-bio-en-france>, consulté le 10/04/2022.

Net 04: Cuypers, P. (2019). Par le groupe de travail sur les biocarburants commun à la commission des affaires économiques et à la commission des affaires européenne, sur la filière française des biocarburants. En ligne sur le site web https://www.senat.fr/rap/r19-136/r19-136_mono.html, consulté le 02/04/2022.

Net 05: La France agricole. Une très forte demande mondiale de bioéthanol. En ligne <https://www.lafranceagricole.fr/observatoire-des-marches/bioethanol-tresforte-demande-mondiale-1,1,2287100844.html>, consulté le 12/04/2022.

Net 06: Winter, A. (2015). Les biocarburants brésiliens, une opportunité pour l'Afrique ?. En ligne sur le site web <https://engworld.mondoblog.org/2015/11/11/les-biocarburants-bresiliens-une-opportunite-pour-les-pays-africains/>, consulté le 18/04/2022.

Net 07: Bouquelet. (2016). Polysaccharides alimentaires. En ligne sur le site web <https://biochim-agro.univ-lille.fr/polysaccharides/co/polysaccharides.html> , consulté le 24/04/2022.

Net 08: Denig, V. (2020). What Is Alcoholic Fermentation?. En ligne sur le site web <https://www.liquor.com/alcoholic-fermentation-5086917>, consulté le 04/05/2022.

Net 09: Whisky. (2022). la fermentation alcoolique- valour+lemaire. En ligne sur le site web <HTTPS://WWW.VALOUR-LEMAIRE.COM/BLOG/LA-FERMENTATION-ALCOOLIQUE/#>, consulté le 04/06/2022.

Net 10: Levac, K. (2019). Comment l'éthanol est-il fabriqué ?. En ligne sur le site web <https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/comment-lethanol-est-il-fabrique>, consulté le 13/05/2022.

Net 11: Prajapati, R. (2021). Azeotropic distillation process Binary separation technique. En ligne sur le site web <https://chemicaltweak.com/azeotropic-distillation-process-binary-separation-technique/>, consultée le 04/04/2021.

Net 12: NGK Insulators. (2021). CO₂ separation membrane developed for industrial exhaust gas confirmed approximately five times the separation factor of DDR-Type zeolite membrane. En ligne <https://www.mynewsdesk.com/ngk-insulators/pressreleases/co2-separation-membrane-developed-for-industrial-exhaust-gas-confirmed-approximately-five-times-the-separation-factor-of-ddr-type-zeolite-membrane-3148259>, consulté le 05/05/2022.

Net 13: Ann. (2011). Bioéthanol. advantages-of-bioethanol. En ligne sur le site web <http://bioethanol-np.blogspot.com/p/advantages-of-bioethanol.html> , consulté le 05/05/2022.

Net 14: Lorecentral. (2018). Advantages and Disadvantage of ethanol biofuels. En ligne <https://www.lorecentral.org/2018/08/advantages-and-disadvantages-of-ethanol-biofuels.html>, consulté le 05/05/2022.

Net 15: Beck. (2019). Sciencing. Advantages disadvantages ethanol biofuel. En ligne sur le site web <https://sciencing.com/advantages-disadvantages-ethanol-biofuel-21990.html>, consulté le 06/05/2022.

Net 16: Francois. Ethanol (l'alcool du vin). En ligne <https://dico-du-vin.com/ethanol-alcool-du-vin/>, consulté le 19/06/2022.

Net 17: L'Oréal groupe. Alcool dans les cosmétiques. En ligne <https://au-coeur-de-nos-produits.loreal.fr/ingredients/alcool-dans-les-cosmetiques>, consulté le 10/06/2022.

Net 18: Nouvelles. (2017). L'éthanol en cosmétique. En ligne <https://www.biusante.parisdescartes.fr/cosmetotheque/pdf/cosmeto-nouv-011.pdf>, consulté le 26/05/2022.

Net 19: Thibault. (2020). Quels sont les substituts du dissolvant pour retirer du vernis à ongles. En ligne sur le site web <https://www.maison-et-beaute.fr/astuces/substituts-dissolvant-retirer-verniss-ongles>, consultée le 10/06/2022.

Net 20: Desing. (2020). Bioéthanol : le chauffage moderne. En ligne sur le site web <https://blog.casaomnia.it/fr/chauffage-au-bioethanol-avantages/>, consulté le 27/05/2022.

Net 21: Thaponorama. (2019). Formule, propriétés, risques et utilisations de l'alcool éthylique. En ligne sur le site web <https://www.thpanorama.com/blog/ciencia/alcohol-etlico-frmula-propiedades-riesgos-y-usos.html>, consulté le 08/06/2022.

Année universitaire : 2021-2022

Présenté par : DJEBA Chaima
LATRECHE Djoumana
OUARET Naila

**Production du bioéthanol à partir de biomasse lignocellulosique par la levure
*Saccharomyces cerevisiae***

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Mycologie et Biotechnologie fongique

Résumé

L'objectif de ce travail est l'étude de la production de bioéthanol à partir de la biomasse végétale par les procédés biotechnologiques. Ceci fait appel au procédé de fermentation anaérobie en utilisant la souche de levure *S. cerevisiae*. De nos jours, *S. cerevisiae* occupe une place privilégiée dans les activités industrielles et elle est considérée comme usine cellulaire pour la production de molécules biosourcées d'intérêt industriel, telles que le bioéthanol. Le bioéthanol issu de la famille des énergies renouvelables, serait un bon substitut aux combustibles fossiles s'il pouvait être produit en fonction de données industrielles et économiques exigées par les populations et sociétés contemporaines. Il est obtenu par fermentation de matériaux agricoles riches en sucres généralement à partir de la biomasse lignocellulosique. Le principal atout que présente la biomasse lignocellulosique tient au fait qu'elle soit très abondante, renouvelable et moins coûteuse. En effet cette biomasse riches en sucres polymérisés de cellulose et hémicellulose peut fournir du bioéthanol après plusieurs étapes de prétraitement (physiques, chimiques, physico-chimiques et biologiques), d'hydrolyse chimique et enzymatique, de fermentation et d'extraction de l'éthanol pur. Cet éthanol d'origine végétale, est un carburant écologique, économique, plus rentable et moins cher que les carburants classiques. Ce qui en fait la solution idéale aux problèmes des énergies renouvelables. Il peut être employé de plusieurs façons dans plusieurs domaines, majoritairement le domaine de transport en addition à l'essence (carburant E85, E20 et E10) ou comme carburant unique dans les moteurs adaptés, dans les industries pharmaceutique, cosmétique, médicale, ainsi que dans la production de bioplastiques et autres.

Mots-clefs : *Saccharomyces cerevisiae*, bioéthanol, production, biomasse lignocellulosique, intérêt du bioéthanol.

Encadreur : LABBANI Fatima-Zohra Kenza (MCA, ENS de Constantine)
Examineur 1 : LEGHLIMI Hind (MCA, Université Frères Mentouri, Constantine 1)
Examineur 2 : DAFFRI Amel (MCA, Université Frères Mentouri, Constantine 1)