

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie de l'Environnement

Mémoire de Master en Génie de l'Environnement

La gestion des déchets des industries alimentaires et production de bioénergie

Présenté par : **Zineb SEKHANE**

Sous la direction de : Mme **A.Hellal**

Professeur (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le (04/10 /2017)

Composition du Jury :

| | | | |
|------------|-----|------------|------------------|
| Président | Mr | A. Namane | MCA (ENP) |
| Promotrice | Mme | A. Hellal | Professeur (ENP) |
| Examineur | Mr | A. Chergui | Professeur (ENP) |

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie de l'Environnement

Mémoire de Master en Génie de l'Environnement

La gestion des déchets des industries alimentaires et production de bioénergie

Présenté par : **Zineb SEKHANE**

Sous la direction de : Mme **A.Hellal**

Professeur (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le (04/10 /2017)

Composition du Jury :

| | | | |
|------------|-----|------------|------------------|
| Président | Mr | A. Namane | MCA (ENP) |
| Promotrice | Mme | A. Hellal | Professeur (ENP) |
| Examineur | Mr | A. Chergui | Professeur (ENP) |

ملخص

ساهمت الزيادة المستمرة في عدد سكان العالم في زيادة إنتاج الأغذية في العالم وبالتالي زيادة النفايات، وقد أصبحت هذه الزيادة الكبيرة في إنتاج نفايات الأغذية قضية عالمية؛ يجب القيام بإدارة جيدة لتقليل كمية هذه النفايات. يعد تجميع أنواع النفايات المختلفة من أهم الخطوات في إدارة النفايات. إنتاج الطاقة الحيوية من النفايات الغذائية هو نوع من التمثيل الذي يفيد الإنسان والبيئة. صناعة السكر هي واحدة من الصناعات الغذائية التي يعيد تدوير نفاياتها لإنتاج الطاقة الحيوية، على سبيل المثال أنها تنتج الإيثانول الحيوي من دبس السكر.

الكلمات المفتاحية

مصانع الغذاء، الطاقة الحيوية، النفايات، الاحتراق، التخمر.

Abstract

The constant increase in the world population has contributed to the increase in the production of world food and thus the increase in waste. This significant increase in the production of food waste has become a global issue; good management must be done to decrease the quantity of these wastes. The valorization of different types of waste is one of the most important steps in waste management. The production of bioenergy from food waste is a type of valorisation that benefits man and the environment. The sugar industry is one of the food industries that recycles their waste for the production of bioenergy, for example it produces bioethanol from molasses.

Keys words

Food industry, Bioenergy, Waste, Combustion, Fermentation.

Résumé

L'augmentation constante de la population mondiale a contribué à l'augmentation de la production de la nourriture mondiale et donc l'augmentation des déchets. Cette augmentation significative de la production des déchets alimentaires est devenue un enjeu global ; une bonne gestion doit se faire pour diminuer la quantité de ces derniers. La valorisation de différents types de déchets est l'une des plus importantes étapes de gestion des déchets. La production de bioénergie à partir des déchets alimentaires est un type de valorisation qui bénéficie l'homme et l'environnement. Pour exemple, l'industrie sucrière est l'une des industries alimentaires qui valorise ses déchets pour la production de bioénergie sous forme de bioéthanol à partir de la mélasse.

Mots clés

Industrie alimentaires, Bioénergie, Déchets, Combustion, Fermentation.

Dédicace

A la plus belle créature que Dieu a créée sur terre

A cette source de tendresse, de patience et de générosité ...

A ma mère !

A la personne la plus cher à mon cœur PAPA !

A mes chers frères

Aux familles Sekhane et Bouchareb

A tous mes amis

*A tous ceux qui m'aiment et tous ceux qui ont été toujours là pour
moi.*

Zineb

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier

Mme Amina Hellal, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique,

pour sa rigueur scientifique, sa patience et son aide.

Je tiens à remercier également Mr Namane, professeur à

L'Ecole Nationale Polytechnique pour avoir accepté de présider cet honorable

juré. Ainsi que Mr Chergui, professeur à l'Ecole Nationale

Polytechnique

, pour avoir accepté d'examiner ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements à tous les enseignants qui, par leur enseignement, leur

encouragement et leur aide, ont contribués à ma formation durant mes études.

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction _____ 12

Chapitre I

Industries alimentaires

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | Définition | 15 |
| 2 | Principaux acteurs | 15 |
| 3 | Huit grandes familles des industries alimentaires | 16 |
| 3.1 | L'industrie de la viande | 16 |
| 3.2 | L'industrie laitière | 16 |
| 3.3 | L'industrie sucrière | 16 |
| 3.4 | La fabrication de produits alimentaires élaborés | 16 |
| 3.5 | La fabrication de produits à base de céréales | 16 |
| 3.6 | La fabrication d'huiles, de corps gras et de margarines | 16 |
| 3.7 | La fabrication de produits alimentaires divers | 16 |
| 3.8 | La fabrication de boissons et alcools | 17 |

Chapitre II

Bioénergie

| | | |
|-----------|-------------------|-----------|
| 1. | Définition | 19 |
|-----------|-------------------|-----------|

| | |
|--|-----------|
| 2. Production de bioénergie | 20 |
| 2.1 Biocarburants | 20 |
| 2.1.1 Définition des biocarburants | 20 |
| 2.1.2 Production des biocarburants | 20 |
| 2.2 Biocombustible | 29 |
| 2.2.1 La combustion | 29 |
| 2.2.2 Différents types de biomasse et leurs utilisations potentielles | 30 |

Chapitre III

Déchets des industries alimentaires

| | |
|---|-----------|
| 1. Définition des déchets | 33 |
| 2. Différents types des déchets de l'industrie alimentaire | 33 |
| 2.1 Effluents des industries alimentaires | 33 |
| 2.1.1 Paramètres qui permettent d'apprécier la qualité des effluents | 33 |
| 2.1.2 Caractéristiques spécifiques de certaines activités agroalimentaires | 33 |
| 2.2 Rejets gazeux | 34 |
| 2.3 Déchets solides | 34 |
| 2.3.1 Déchets dangereux | 35 |
| 2.3.2 Déchets d'emballage | 35 |
| 2.3.3 Boues | 35 |
| 2.3.4 Déchets organiques : | 35 |
| 3. Gestion des déchets | 35 |
| 3.1 Prévention des déchets | 36 |
| 3.2 Réemploi | 36 |
| 3.3 Recyclage | 36 |
| 3.4 Valorisation des déchets qui n'ont pu être évités ou recyclés | 36 |
| 3.5 Élimination des déchets | 37 |

Chapitre IV

Industries sucrières

| | |
|--|-----------|
| 1. Introduction | 40 |
| 2. Présentation des industries sucrières | 40 |
| 3. Production du sucre | 40 |
| 4. Déchets de sucrerie de betterave | 42 |
| 5. Gestion des déchets | 42 |
| 5.1 La prévention des déchets | 42 |
| 5.2 Recyclage | 43 |
| 5.3 Valorisation | 43 |
| 5.3.1 Pulpe | 43 |
| 5.3.2 Feuilles, herbes et radicules | 43 |
| 5.3.3 Écumes | 44 |
| 5.3.4 Cendres | 44 |
| 5.3.5 Mélasse | 44 |
| 5.3.6 Vergeoise | 44 |
| 5.3.7 Vinasses | 44 |
| 5.3.8 Eau usée | 45 |
| 6. Production de bioénergie | 45 |
| 6.1 Procède de fabrication de bioéthanol (fermentation alcoolique) à partir de la mélasse | 45 |
| 6.1.1 Souche utilisée | 46 |
| 6.1.2 Paramètres influant la production d'éthanol -Biomasse | 46 |
| 6.1.3 Voie biochimique | 48 |
| Conclusion générale | 50 |
| Bibliographe | 52 |

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : les 5 plus grosses entreprises mondiales en termes de chiffre d'affaires de l'industrie agroalimentaire en 2009. _____ 15

Chapitre II

Tableau II.1: Principales biomasses utilisées pour la production d'énergie. _____ 19

Chapitre III

Tableau III.1 : caractéristiques moyennes de production de la pollution pour les produits à base de viande exprimées en concentration dans l'effluent de sortie (exprimés en mg.L^{-1}). 34

Tableau III.2 : caractéristiques moyennes de production de la pollution pour les produits à base de lait exprimées par concentration dans l'effluent (mg.L^{-1} d'effluent) _____ 34

Tableau III.3 : Exemples de valorisation de sous-produits des industries alimentaires _____ 37

Chapitre IV

Tableau IV.1: composition moyenne de betterave en sucre. _____ 40

Tableau IV.2: composition chimique des mélasses de betterave et de canne. _____ 45

Liste des figures

Chapitre II

| | |
|---|----|
| Figure II.1: les différents procédés de production de biocarburants à partir de différentes biomasses. _____ | 21 |
| Figure II.2 : Production de biocarburants dans le monde en 2003. _____ | 21 |
| Figure II.3: Étapes biologiques de la filière de méthanisation de déchets organiques, pouvant être précédées et suivies de traitements mécaniques, et/ou physico-chimiques divers. _____ | 22 |
| Figure II.4: Principales étapes de la digestion anaérobie _____ | 23 |
| Figure II.5: Voies générales de dégradation de la matière organique sous conditions anaérobies. _____ | 26 |
| Figure II.6 : schéma basique pour la production de biodiesel _____ | 27 |
| Figure II.9 : La réaction de transestérification. R est un mélange de diverses chaînes d'acides gras. L'alcool utilisé pour la production de biodiesel est le méthanol ($R = CH_3$) _____ | 28 |
| Figure II.10 : exemple d'utilisation de biodiesel. _____ | 28 |
| Figure II.11 : Les différents procédés peuvent être utilisés pour obtenir de l'électricité et de la chaleur à partir de la biomasse. _____ | 29 |

Chapitre III

| | |
|---|----|
| Figure III.1: Hiérarchie de la gestion des déchets. _____ | 36 |
|---|----|

Chapitre IV

| | |
|--|----|
| Figure IV.1: Schème de procède de production en sucrerie de betterave. _____ | 41 |
| Figure IV.2: Schéma de fabrication du sucre de betterave. _____ | 42 |

La liste des abréviations

AGV: acide gras volatil

DAA: déchets agroalimentaire

DBO₅: demande biochimique en oxygène

DCO: demande chimique en oxygène

DMA: déchets ménagers assimilés

DME: diméthyléther

EMHV: ester méthylique d'huile végétale

ETBE: éthyltertiobutyléther

GNV: gaz naturel pour véhicules

IAA: industrie agroalimentaire.

ICPE: installation classée pour la protection de l'environnement.

Mde: milliards de dollars.

MES: matières en suspension.

MO: matières oxydables.

MS: matière sèche.

MTBE: méthyl tertbutyl éther.

NTK: azote total kjeldahl.

OMS: organisation mondiale de la santé.

PIB : produit intérieur brut.

TTCR: taillis à très courte rotation.

UE: union européenne.



Introduction



Introduction

Durant les cent dernières années, l'augmentation constante de la population mondiale a contribué à l'augmentation de la production de la nourriture mondiale et donc l'augmentation des déchets de celle-ci en grande quantité. Cette augmentation significative de la production des déchets alimentaires est devenue un enjeu global.

Dans les pays développés, il est entendu que c'est le rôle du politique d'assurer que la quantité, la qualité et le coût des aliments permettent à leurs populations de satisfaire à ces exigences vitales. Ceci est assuré par les industries agroalimentaires (IAA). En Algérie ces Industries ont connu leur essor dans les années 70 avec les programmes publics de développement visant à la création de sociétés nationales, notamment dans les filières céréales, lait, eaux et boissons. Ces filières restent les plus importantes mais sont suivies maintenant par celles du sucre, des corps gras, des conserves, des viandes, etc.

En effet aux yeux du gouvernement, les IAA ont une grande importance parce qu'elles visent à assurer la sécurité alimentaire du pays, mais aussi parce que l'agriculture et les IAA emploient près de 23% de la population active (Cherif, 2015).

Le traitement à grande échelle d'un volume important de matières peut avoir un impact considérable sur l'environnement. Dans l'industrie alimentaire, la menace pour l'environnement tient plus aux polluants organiques qu'aux substances toxiques. Des techniques de production capables de limiter les pertes de produits ont pour double fonction d'améliorer le rendement et de réduire les problèmes potentiels de déchets et de pollution. De plus l'industrie de transformation des aliments requiert aussi d'importants volumes d'eau qui doivent répondre à des critères de qualité donc des traitements spécifiques qui varient selon leur utilisation. En plus des eaux, dans la phase de post consommation, le problème des emballages est de plus en plus préoccupant. En dépit de l'extrême diversité qui caractérise les sous-secteurs de cette industrie, les méthodes de prévention et de lutte contre la pollution présentent de nombreux traits communs (Malagié et al., 2000).

La prévention des déchets permet de concilier bénéfices économiques et protection de l'environnement. Tout déchet a effectivement un coût direct (gestion interne et externe, manutention, enlèvement...) et indirect (production, pollution...). Si produire moins de déchets permet de réaliser de réelles économies, comme le prouvent les témoignages des pionniers de la prévention, l'impact écologique s'en trouve logiquement allégé. Néanmoins, cela peut s'avérer difficile voire impossible et nécessite alors de réfléchir à la valorisation de ces déchets en recourant à des filières de récupération et de traitement qui permettent de réelles économies de matière première.

La prévention et la valorisation relève d'une politique de gestion globale qui constitue un projet fédérateur au sein de l'entreprise et contribue à améliorer son image, mais aussi, selon les contextes, sa propreté, tout en réduisant parfois également certains risques pour les personnels. S'engager dans une stratégie de gestion des déchets associant prévention et valorisation est à la portée de tous.

L'objectif de ce travail est de présenter les différents types de gestion des déchets alimentaires, tout en se concentrant sur une solution très intéressante, selon les rendements

Introduction

qu'elle offre mais aussi l'argent qu'elle génère, qui est la valorisation des déchets alimentaires dans la production de bioénergie en prenant comme exemple l'industrie sucrière.



Chapitre I

Industries alimentaires



1 Définition

La dénomination «industries alimentaires» ou encore « industrie agroalimentaire » (en abrégé IAA) recouvre toute une série d'activités industrielles visant au traitement, à la préparation, à la transformation, à la conservation et au conditionnement des denrées destinées essentiellement à l'alimentation humaine. D'origine végétale ou animale, les matières premières utilisées proviennent de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche (Malagié et al, 2000).

2 Principaux acteurs

À l'échelle mondiale, les industries agroalimentaires représenteraient 4% du PIB mondial, le tableau I.1 représente les 5 plus grosses entreprises mondiales en termes de chiffre d'affaires de l'industrie agroalimentaire en 2009

Les Etats-Unis affichent, en 2008, un chiffre d'affaires estimé à plus de 480 milliards de dollars. Les entreprises américaines se retrouvent d'ailleurs en tête du classement des plus grandes entreprises mondiales de ce secteur.

La Chine est également un acteur de poids avec un chiffre d'affaires de 345 Mde (Agence de développement et de promotion économique de la région centre, 2012).

Tableau I.1 : les 5 plus grosses entreprises mondiales en termes de chiffre d'affaires de l'industrie agroalimentaire en 2009(Agence de développement et de promotion économique de la région centre, 2012).

| Rang | Entreprise | Pays | Chiffre d'affaire en MD€ |
|------|-------------------------|------------|--------------------------|
| 1 | Cargill | Etats-Unis | 83,1 |
| 2 | Nestlé | Suisse | 68,9 |
| 3 | PepsiCoInc | Etats-Unis | 29,2 |
| 4 | Kraft FoodsInc | Etats-Unis | 28,5 |
| 5 | Archer Daniels Midlands | Etats-Unis | 23,2 |

3 Huit grandes familles des industries alimentaires

Les huit grandes familles composent ce secteur sont : (Agence de développement et de promotion économique de la région centre, 2012 ; Moletta, 2006).

3.1 L'industrie de la viande

- Abattage du bétail, de la volaille ;
- Transformation et conservation de la viande de boucherie ;
- Transformation et conservation de la viande de volaille ;
- Préparation industrielle de produits à base de viande.

3.2 L'industrie laitière

- Fabrication du lait, du beurre, des yaourts, des fromages, du lait en poudre ou concentré;
- Fabrication du lait pour l'industrie alimentaire (caséine, lactose, protéines ultra-filtrées..);
- Fabrication de crèmes glacées et glaces.

3.3 L'industrie sucrière

- Fabrication de sucre ;

3.4 La fabrication de produits alimentaires élaborés

Fruits, légumes, poissons, plats cuisinés et confitures.

3.5 La fabrication de produits à base de céréales

- Meunerie ;
- Autres activités du travail des grains ;
- Fabrication de produits amylacés ;
- Fabrication industrielle de pain et de pâtisserie fraîche ;
- Fabrication de biscuits, biscottes et pâtisseries de conservation ;
- Fabrication de semoules et pâtes alimentaires ;
- Fabrication des aliments pour animaux d'élevages et domestiques.

3.6 La fabrication d'huiles, de corps gras et de margarines

- Fabrication d'huiles et graisses brutes ;
- Fabrication d'huiles et graisses raffinées ;
- Fabrication de margarine et graisses comestibles similaires.

3.7 La fabrication de produits alimentaires divers

- Fabrication de Chocolat, confiserie ;
- Fabrication des herbes aromatiques, vinaigres ;
- Transformation et conservation de poisson, de crustacés et de mollusques
- Transformation du thé et du café ;
- Fabrication de condiments et assaisonnements ;
- Fabrication de plats préparés, des aliments pour bébés et produits de régime ;
- Fabrication d'aliments homogénéisés et diététiques.

3.8 La fabrication de boissons et alcools

- Industrie des eaux minérales ;
- Fabrication de cidre et jus de fruits et de légumes ;
- Production de boissons alcooliques distillées ;
- Fabrication de vins effervescents ;
- Vinification ;
- Production d'autres boissons fermentées non distillées ;
- Fabrication de bière ;
- Fabrication de malt ;
- Production de boissons rafraîchissantes et apéritives.



Chapitre II

Bioénergies



1. Définition

La bioénergie désigne l'énergie de la biomasse transformée en chaleur, en électricité, en gaz ou en carburant.

Le terme de biomasse regroupe toutes les matières organiques qui peuvent dégager de l'énergie soit par combustion directe ou à la suite d'une étape de transformation. La biomasse représente donc aussi bien la fraction biodégradable des déchets industriels ou agricoles que le bois issu directement de la forêt (Syndicat des énergies renouvelables, 2015).

Le tableau II.1 représente les principales biomasses utilisées pour la production d'énergie.

Tableau II.1 : Principales biomasses utilisées pour la production d'énergie (Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement, 2009).

| | Productions agricoles | Productions forestières |
|---|--|---|
| Résidus des activités de production | - Pailles de céréales, anas de lin, balles de riz, rafles de maïs, grains déclassés, etc. -Effluents d'élevage : lisiers, fumiers, purins, fientes, etc. | -Rémanents forestiers : houppiers, souches, etc. |
| Résidus des industries de transformation | -Effluents et déchets d'industries agroalimentaires | -Coproducts de scieries, de menuiseries, etc. (dosses, sciures, copeaux, chutes diverses, etc.) |
| Cultures dédiées (« cultures énergétiques ») | -Agro-carburants : betteraves, colza, canne à sucre, etc. | -Taillis à très courte rotation (TTCR) de saules, de peupliers, etc. -Taillis pour bois de chauffe, miscanthus |
| Autres biomasses (résidus d'activités humaines) | -Fraction organique des déchets ménagers -Boues de stations d'épuration -Tontes de pelouses -Huiles de friture -Bois de démolitions ou de « parcs à conteneurs » | |

Dans notre cas on s'intéresse à la production d'énergie à partir des déchets des industries alimentaires qui sont des déchets riches en matières biodégradables.

2. Production de bioénergie

Les bioénergies obtenues recouvrent :

- les **biocarburants** pour les moteurs ;
- les **biocombustibles** pour produire de la chaleur seule ou combinée à une production de bioélectricité (cogénération)(Gagnepain, 2016).

2.1 Biocarburants

2.1.1 Définition des biocarburants

Selon la directive européenne 2003/30/CE du 8 mai 2003, reprise par la directive 2009/28/CE, la définition des **biocarburants** est la suivante :

« Combustibles liquides ou gazeux utilisés pour le transport et produit à partir de la biomasse », donc obtenus à partir des matières organiques végétales et animales non fossiles.

La même directive cite également 10 produits considérés comme biocarburants : bioéthanol, biodiesel (esters d'huile végétale ou animale), biogaz, bio-méthanol, bio-diméthyléther (bio-DME), bio-ETBE, bio-MTBE, biocarburants synthétiques, bio-hydrogène, huiles végétales pures.

Les biocarburants sont des **énergies renouvelables** et, contrairement aux énergies fossiles, ne contribuent pas à aggraver certains impacts environnementaux globaux, à condition que leur production soit effectuée dans des conditions énergétiques performantes et sobres en énergies fossiles et de durabilité (Gagnepain, 2016).

2.1.2 Production des biocarburants

La figure **II.1** présente un aperçu des différents procédés de production de biocarburants à partir de différentes biomasses.

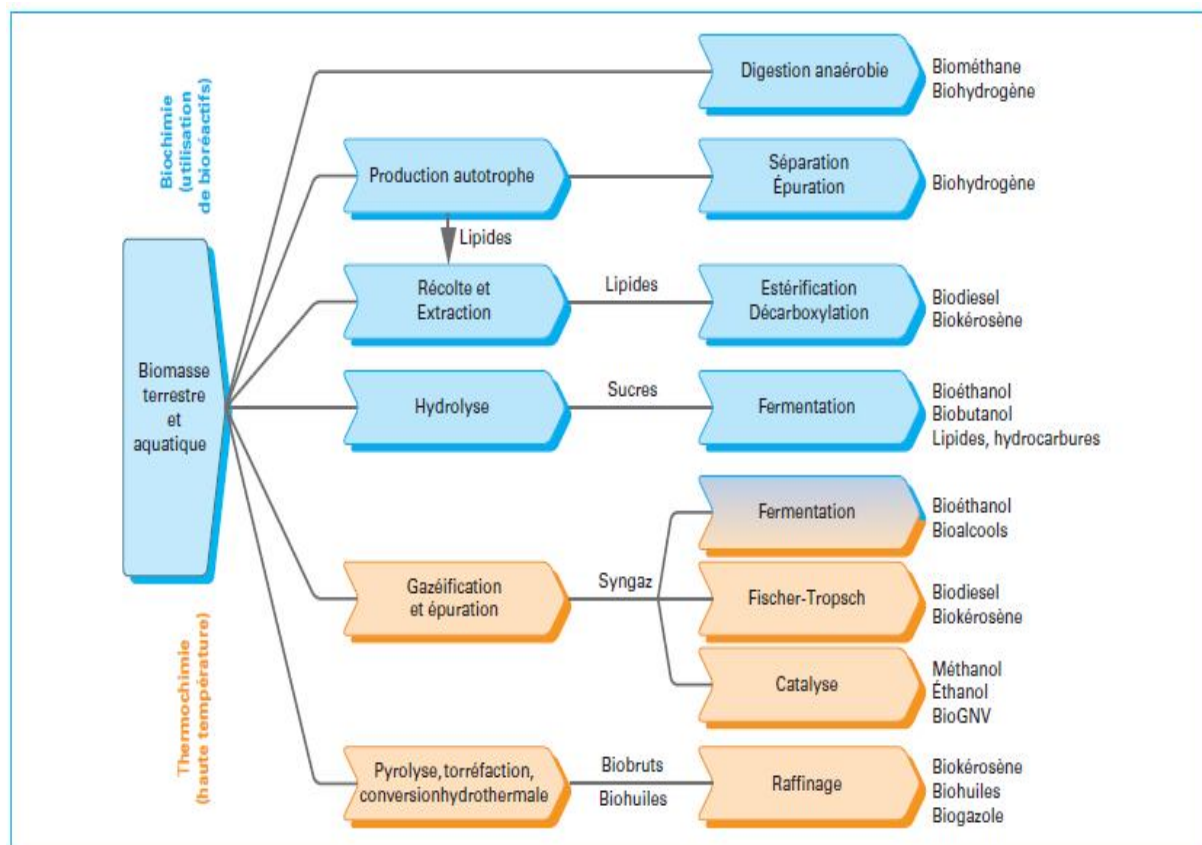
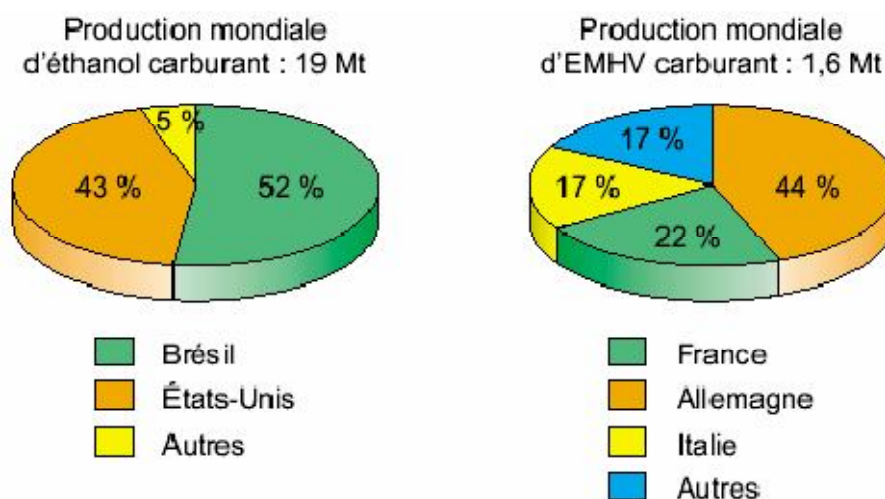


Figure II.1 : les différents procédés de production de biocarburants à partir de différentes biomasses (Gagnepain, 2016).

La figure II.2 présente les différents pourcentages de la Production de biocarburants dans le monde en 2003.



Consommation mondiale de pétrole dans les transports routiers : 1,5 Gt

Figure II.2 : Production de biocarburants dans le monde en 2003 (Ministère de l'agriculture et de la pêche, 2006).

Nous allons citer les étapes de la production de quelques biocarburants.

2.1.2.1 La production de biogaz (bio méthane)

La méthanisation est un processus de digestion anaérobie permettant d'atteindre généralement un double objectif de valorisation énergétique par récupération de méthane (CH_4) et de stabilisation des déchets organiques en vue d'une valorisation matière par sa restitution partielle au sol. La filière globale de traitement comporte souvent au moins deux étapes comme l'illustre la figure II.3.

Ce mode de traitement est applicable à une large gamme de matériaux organiques celluloseux : bouse de bovins, fiente de volailles, lisier de porcins, excrément humain, résidus végétaux, fractions organiques fermentescibles des DAA et DMA (Lacour, 2012).

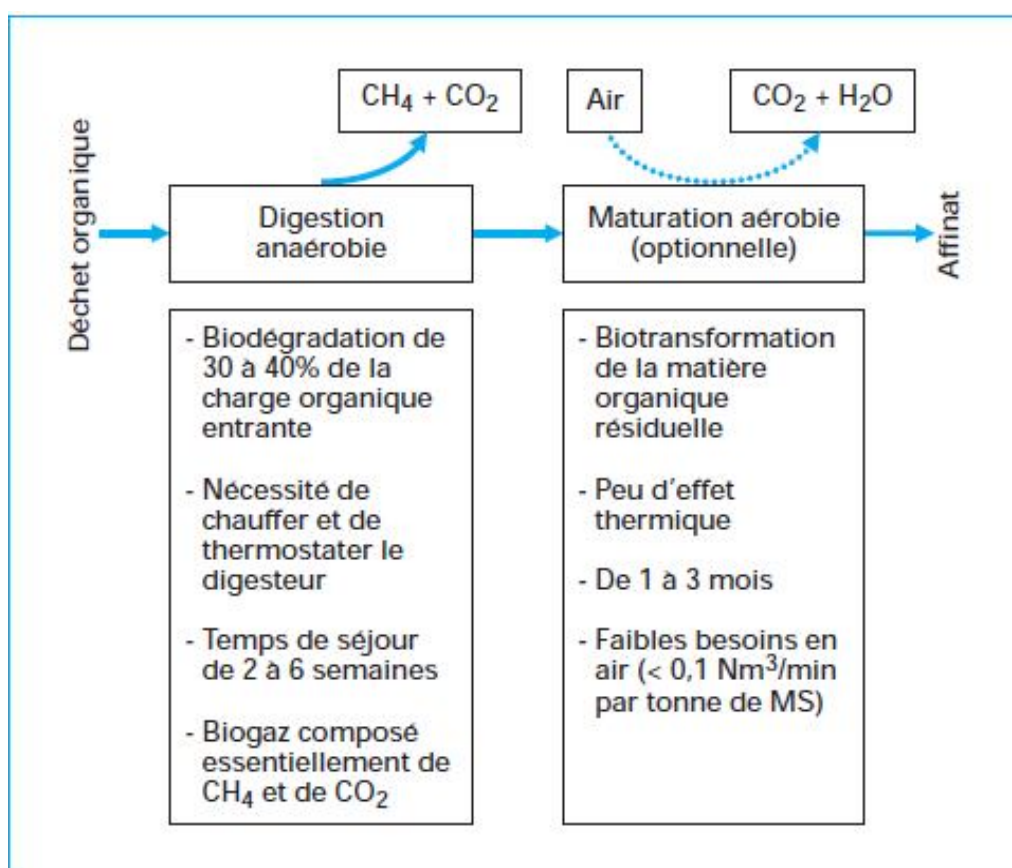


Figure II.3 : Étapes biologiques de la filière de méthanisation de déchets organiques, pouvant être précédées et suivies de traitements mécaniques, et/ou physico-chimiques divers (Bayard & Gourdon, 2007).

2.1.2.1.1 Etapes de digestion anaérobie

Les étapes intermédiaires à la formation de méthane sont résumées dans la figure II.4 qui présente l'ensemble des voies métaboliques, avec leurs groupes de micro-organismes respectifs, en 3 étapes principales : (A) l'hydrolyse et acidogénèse ; (B) l'acétogénèse ; (C) la méthanogénèse.

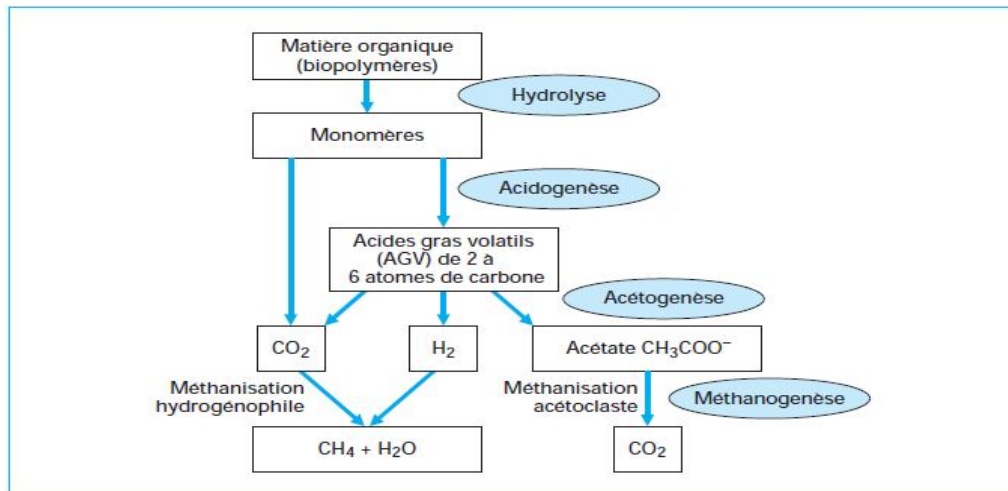


Figure II.4 : Principales étapes de la digestion anaérobie (Bayard, et al., 2007).

A. Hydrolyse et acidogénèse

Cette étape est réalisée par 2 grands groupes de micro-organismes anaérobies stricts ou facultatifs (Lacour, 2012):

A.1 Les micro-organismes dits hydrolytiques (une grande diversité de bactéries et également des champignons dans le cas où l'étape d'hydrolyse serait effectuée en présence d'oxygène) produisent des enzymes hydrolytiques qui dégradent les particules solides et les polymères (solubles et non solubles) à longues chaînes carbonées (protéines, polysaccharides, lipides) en composés monomères et dimères (sucres, acides organiques, acides aminés, etc.). Une fois solubilisées, les substances organiques sont disponibles pour être assimilées par le 2ème groupe de micro-organismes appelés génériquement bactéries acidogènes.

A.2 Les bactéries fermentatives réalisent l'acidogénèse ou fermentation des substances monomères organiques en hydrogène ou formate, dioxyde de carbone, pyruvate, AGV (acides acétique, propionique, butyrique, valérique, etc.) et autres produits organiques (éthanol, cétones ou acides lactique, succinique, etc.). L'acidogénèse est généralement déterminante pour l'équilibre de l'ensemble du processus de digestion anaérobie, en raison des molécules intermédiaires d'hydrogène et d'AGV produites simultanément lors de cette étape. En effet, l'accumulation d'hydrogène peut inhiber l'acétogénèse et la méthanisation acétoclaste, conduisant ainsi à une accumulation des AGV. L'accumulation d'AGV conduit à une baisse de pH et inhibe par conséquent l'ensemble du processus de digestion anaérobie.

B. Acétogénèse

Les vitesses réactionnelles de l'acétogénèse sont généralement lentes et soumises à des problèmes d'inhibition liée à la présence de l'hydrogène qui modifie l'équilibre

thermodynamique des réactions. Au cours de cette étape, les intermédiaires métaboliques sont transformés par 3 principaux groupes bactériens :

B.1. Les bactéries acétogènes productrices obligées d'hydrogène (bactéries syntrophiques) oxydent les composés préalablement réduits (alcools et AGV) en hydrogène, gaz carbonique, et acétate.

B.2. Les bactéries homoacétogènes réalisent la respiration acétogénique des bicarbonates, le catabolisme des mélanges d'hydrogène et de dioxyde de carbone et la production d'acide acétique, entrant ainsi en compétition avec les bactéries méthanogènes pour l'hydrogène.

B.3. Les bactéries sulfato-réductrices oxydent les composés réduits (alcools, acides butyrique et propionique) en dioxyde de carbone et acétate, puis l'acétate en dioxyde de carbone. L'hydrogène est également oxydé en présence des sulfates.

C. Méthanogènes

La méthanogènes est réalisée en condition anaérobie stricte, avec des potentiels d'oxydo-réduction très bas, et suivant 2 voies principales par des archées, du groupe des micro-organismes dits « extrémophiles » :

C.1 Les archées (anciennement appelées archéobactéries) dites acétoclastes, principalement les genres *Methanosarcina* et *Methanotrix* convertissent l'acide acétique en méthane et dioxyde de carbone. Ces archées ont des taux de croissance relativement lents, avec des temps de doublement de population d'environ 24 heures, affectés par la pression partielle d'hydrogène.

C.2 Les archéobactéries dites hydrogénéophiles, en particulier les genres *Methanobacterium* et *Methanococcus*, réduisent le gaz carbonique par respiration méthanogène, en présence de l'hydrogène pour produire du méthane et de l'eau. Elles ont une croissance plus rapide que les acétoclastes, avec des temps de doublement compris entre 4 et 6 heures. D'autres substrats comme le méthanol et l'acide formique peuvent également être consommés par ces micro-organismes.

2.1.2.1.2 Traitement du digestat

Le digestat est la matière résiduelle obtenue après digestion anaérobie du déchet. Différents types de post traitements sont envisageables en fonction du déchet traité et des objectifs de stockage, de valorisation ou d'élimination du digestat (Bayard, et al., 2007) :

-Traitements mécaniques

Pour les digestats boueux (taux de matières sèches < 15 % de la masse brute), il s'agit notamment d'opérations de séparation solide-liquide (décantation, centrifugation ou filtration), visant à récupérer la phase aqueuse, qui devra elle-même être épurée avant rejet dans le milieu naturel, et la fraction solide qui pourra, si nécessaire, subir certains des traitements évoqués ci-après. Pour les digestats solides, les traitements mécaniques possibles sont des opérations de tri (granulométrique, densimétrique, magnétique...) ou de réduction granulométrique.

-Traitements thermiques

Ce sont essentiellement des opérations de séchage et de granulation (ajout éventuel de certains réactifs favorisant l'agglomération de la fraction solide en granulats) ;

-Traitements physico-chimiques

Il s'agit notamment de la coagulation-floculation destinée à favoriser la séparation liquide/solide pour les digestats boueux ;

-Traitements biologiques

Dans le cas où le digestat contient une fraction organique biodégradable, un traitement complémentaire aérobie de fermentation chaude est envisageable pour poursuivre la biodégradation et sécher le digestat. Pour une valorisation agricole du digestat, une étape finale de stabilisation aérobie est nécessaire, dont l'objectif est similaire à celui de l'étape de maturation du compostage. On obtient *in fine* un matériau similaire au compost, généralement appelé affinat.

2.1.2.2 La production de bio hydrogène

Dans l'environnement naturel, lorsque les conditions deviennent strictement anaérobies, la matière organique est dégradée biologiquement pour produire du méthane et du dioxyde de carbone par un processus microbien dit de « digestion anaérobie » ou « Méthanisation ». Les premières étapes de ce processus consistent en une phase d'hydrolyse des composés organiques les plus complexes (glucides, protéines, lipides) en monomères plus simples, suivie d'une phase d'acidogénèse ou phase de fermentation au cours de laquelle les monomères obtenus précédemment sont métabolisés et transformés en sous-produits métaboliques (acides organiques, alcools).

C'est lors de l'étape d'acidogénèse que, si les conditions sont favorables, il est observé une production d'hydrogène figure II.5.

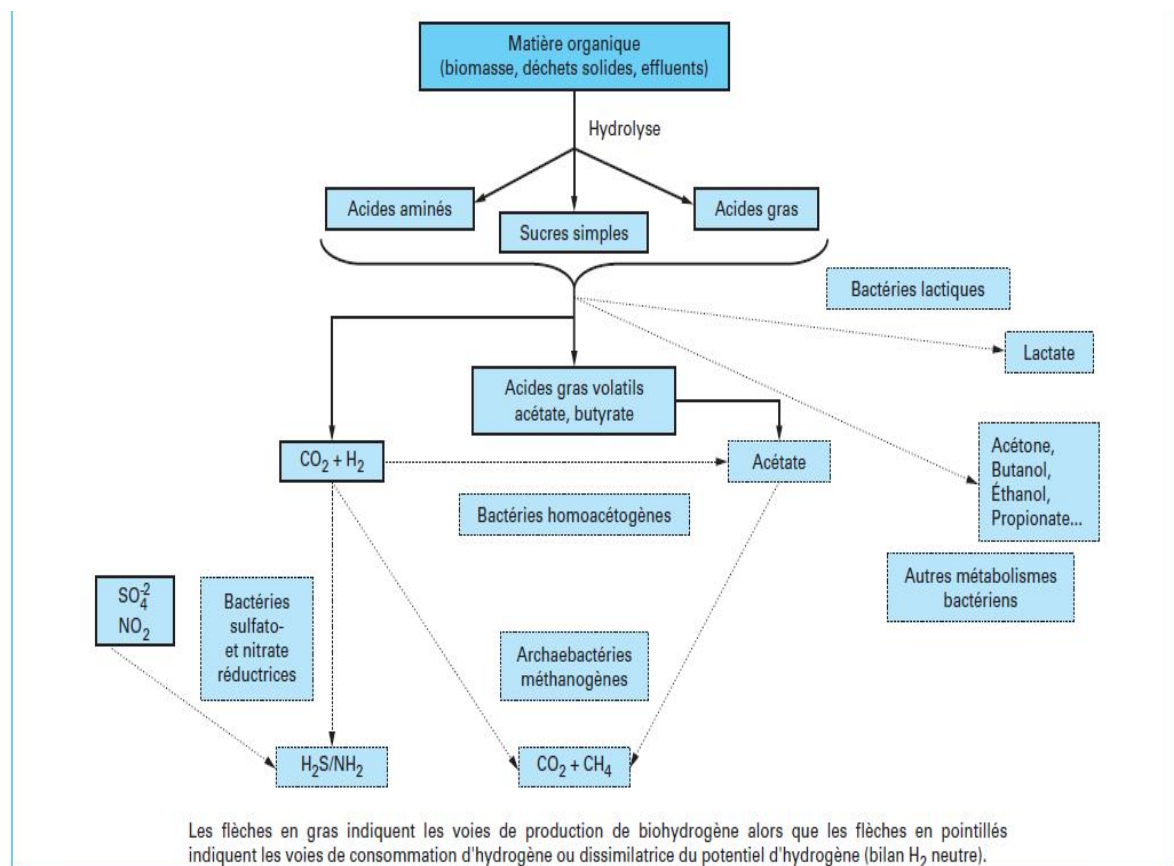


Figure II.5 : Voies générales de dégradation de la matière organique sous conditions anaérobies (Latrille, et al., 2011).

2.1.2.3 La production de bioéthanol

La production d'éthanol est possible par fermentation directe à partir de biomasses contenant une forte proportion de sucres libres, c'est-à-dire de sucres simples non polymérisés. Le processus peut alors se représenter par la réaction suivante (à partir du glucose) réalisée par des levures en condition d'anaérobiose :



La stœchiométrie de cette réaction montre qu'il est possible de récupérer au maximum 0,51 g d'éthanol par gramme de glucose consommé. Dans la pratique, on en récupère en fait 0,3 à 0,45 g, car une partie du glucose est utilisée par les levures pour la synthèse de leur matériel cellulaire.

Cependant, peu de déchets présentent des caractéristiques permettant une fermentation directe, l'exploitation alimentaire de la fraction riche en sucres étant économiquement plus favorable.

En France, seules les mélasses de l'industrie betteravière, certains déchets de fruits (conserverie) ou les lactosérums peuvent éventuellement être exploités en ce sens. Il faut environ 4 à 5 t de mélasses pour produire 1 t d'éthanol (Bayard, et al., 2007).

2.1.2.4 Production de biodiesel

Le biodiesel est fabriqué à partir de produits renouvelables des sources biologiques telles que les huiles végétales et graisses animales. Il est biodégradable et non toxique, de ce fait, bénéficie de l'environnement (Ma, et al., 1999). La figure II.6 représente le schéma basique pour la production de biodiesel.

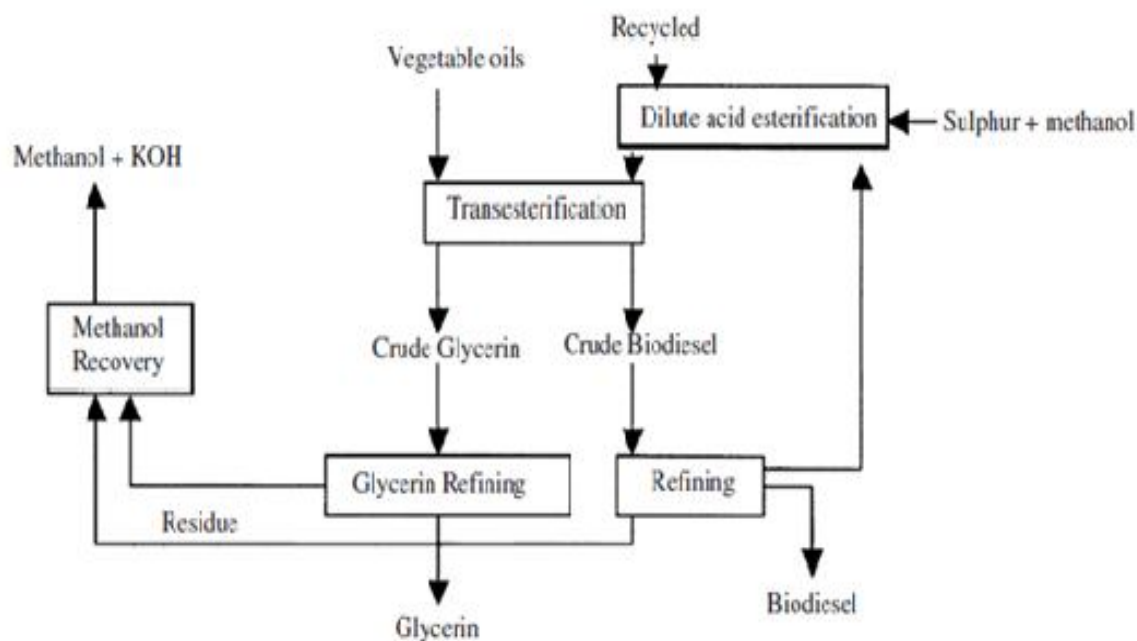


Figure II.6 : schéma basique pour la production de biodiesel (Marchetti, et al., 2007).

Le biodiesel peut être produit à partir d'une grande variété de matières premières. Ces matières premières comprennent les huiles végétales les plus communes (par exemple, le soja, la graine de coton, la palme, arachides, colza, canola, tournesol, carthame, noix de coco) et les graisses animales (généralement du suif) ainsi que des huiles usées (par exemple, des huiles de friture). Le choix de la matière première dépend en grande partie de la géographie. Selon l'origine et la qualité de la matière première, Des changements au processus de production peuvent être nécessaires.

Le biodiesel est miscible au pétro-diesel dans tous les ratios. Dans de nombreux pays, cela a conduit à l'utilisation de mélanges de biodiesel avec du pétro-diesel au lieu du biodiesel pur. Il est important de noter que ces mélanges avec le pétro-diesel ne sont pas du biodiesel. Souvent mélangé avec pétro-diesel est désigné par des acronymes tels que B20, qui indique un mélange de 20% de biodiesel avec pétro-diesel. Bien sûr, les huiles végétales non transformées et les graisses animales ne devraient pas non plus être appelées "biodiesel".

Le méthanol est utilisé comme alcool pour produire du biodiesel parce qu'il est le moins alcool coûteux, bien que d'autres alcools tels que l'éthanol ou iso-propanol puissent produire un carburant biodiesel avec des meilleures propriétés. Souvent, les produits résultants sont également appelé ester méthylique d'acides gras (FAME) au lieu du biodiesel. Bien que d'autres les alcools peuvent, par définition, produire du biodiesel, plusieurs normes maintenant existantes sont conçu de telle sorte que seuls les esters méthyliques peuvent être utilisés comme biodiesel si les normes sont respectées correctement (Knothe, et al., 2005).

La figure II.7 représente la réaction principale pour produire le biodiesel.

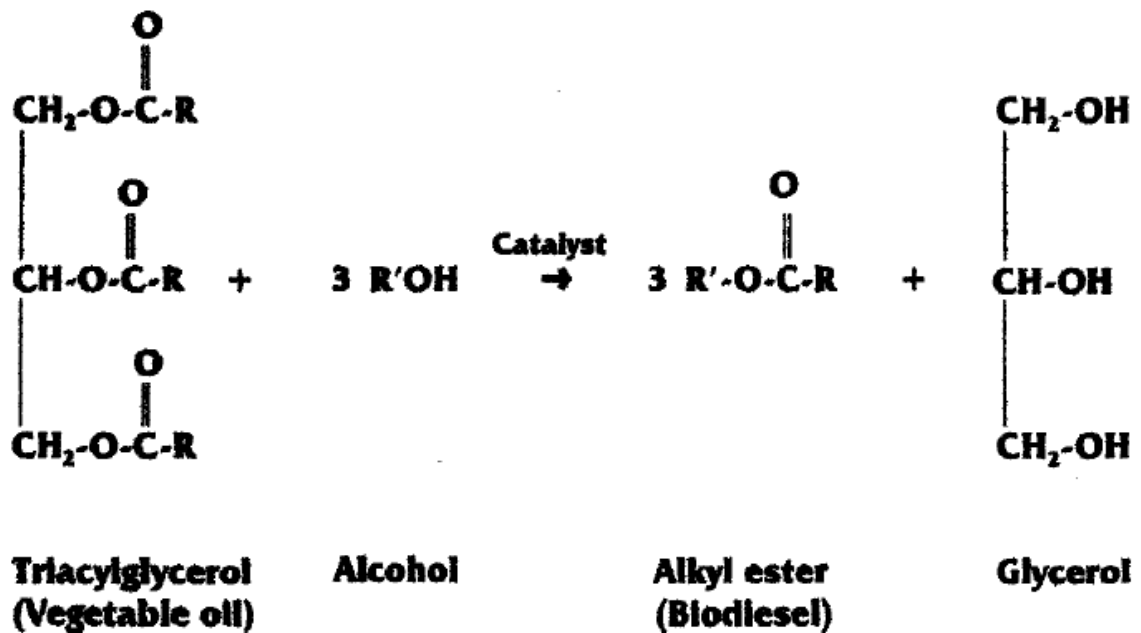


Figure II.7 : La réaction de transestérification. R est un mélange de diverses chaînes d'acides gras. L'alcool utilisé pour la production de biodiesel est le méthanol ($\text{R}' = \text{CH}_3$) (Knothe, et al., 2005).

La figure II.8 donne un exemple d'utilisation de biodiesel.

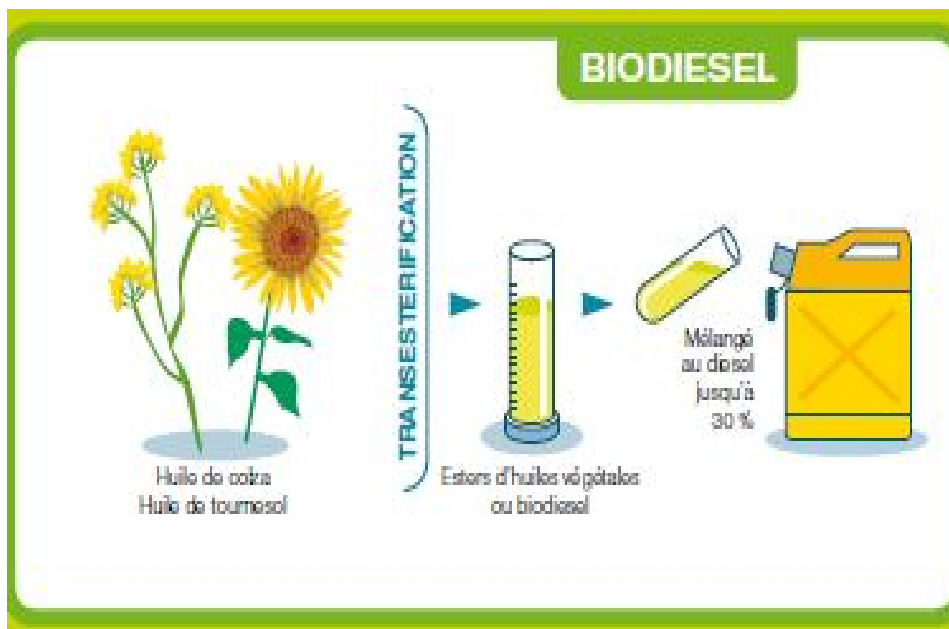


Figure II.8 : exemple d'utilisation de biodiesel (Bauduin, 2014).

2.2 Biocombustible

2.2.1 La combustion

Le procédé consiste à utiliser de la biomasse comme combustible pour chauffer de l'eau jusqu'à obtenir de la vapeur haute pression (la figure II.9). La combustion se passe dans des chaudières

industrielles adaptées aux caractéristiques de la matière végétale (composition chimique, taux d'humidité). La vapeur chauffée est :

- soit utilisée pour alimenter un réseau de chaleur urbain ou des industriels avoisinants ;
- soit introduite dans une turbine à vapeur produisant de l'électricité.

La combinaison des deux s'appelle la cogénération, ce qui est le cas le plus courant pour la combustion.

Les centrales de combustion sont conçues en fonction de la composition physicochimique de la biomasse, de façon à obtenir un rendement important. La chaudière seule peut avoir un rendement thermique allant jusqu'à 92% et son rendement électrique varie entre 20 et 30%. L'efficacité des centrales de cogénération est plus élevée, jusqu'à 90%, que celle des centrales purement électrogènes car la chaleur produite est mieux valorisée (Bauduin, 2014).

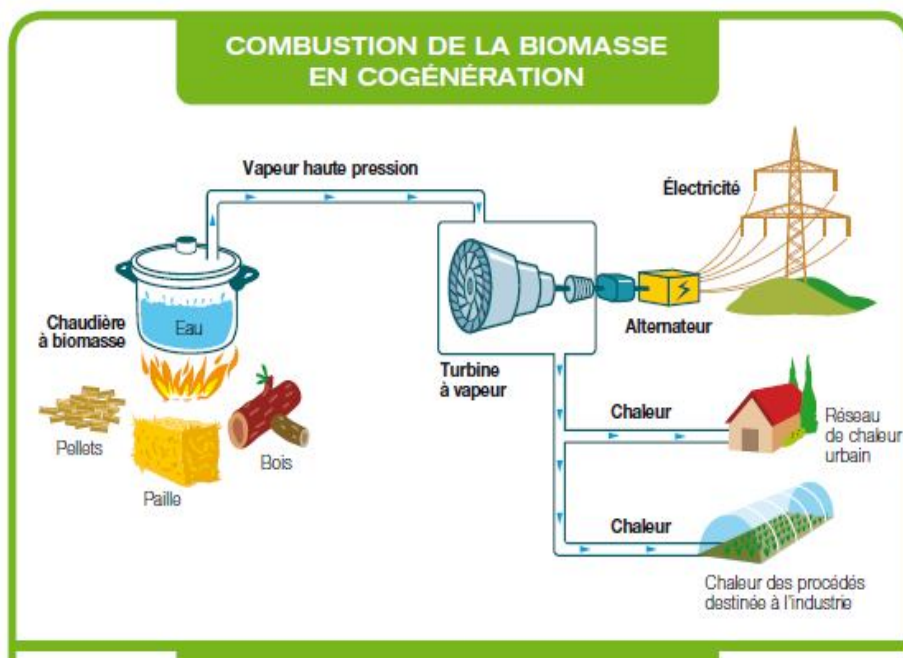


Figure II.9: Les différents procédés peuvent être utilisés pour obtenir de l'électricité et de la chaleur à partir de la biomasse (Bauduin, 2014).

2.2.2 Différents types de biomasse et leurs utilisations potentielles

La biomasse se présente sous des formes très diverses : solide, liquide, boue, poussière de bois, granulés, etc. et possède des caractéristiques parfois très différentes.

➤ LA BIOMASSE « SECHE »

Lorsqu'elle n'est pas trop humide, la biomasse peut être brûlée en **combustion directe**. La combustion permet de libérer rapidement et facilement une quantité importante de chaleur. Cette chaleur est utilisée pour assurer des besoins de chauffage (industriels ou domestiques) ou pour être partiellement ou totalement convertie en électricité. Le bois est couramment utilisé sous différentes formes :

- bûches
- plaquettes de bois broyés
- sciure et/ou copeaux de bois
- granulés de sciure agglomérée.

On parle alors de **bois énergie**. La production d'énergie à partir de bois est fort développée au niveau domestique (feux ouverts, poêles, inserts) et au niveau industriel (chaufferies au bois, cogénérations industrielles au bois).

D'autres biomasses sèches conviennent également pour la combustion : les balles de riz, la paille de céréales, les rafles de maïs, etc.

A côté de la combustion directe, d'autres technologies existent pour produire de l'énergie à partir de biomasses sèches comme la **gazéification** ou la **pyrolyse**.

➤ LA BIOMASSE « HUMIDE »

Lorsqu'elle est trop humide pour être brûlée, la biomasse est fermentée à l'abri de l'air et libère un mélange gazeux, riche en méthane (gaz naturel) : c'est la **biométhanisation**. Les biomasses habituellement utilisées pour la biométhanisation sont :

- Les effluents d'élevage : lisiers, fumiers, purins, etc.
- Les effluents liquides des industries agroalimentaires
- Certains effluents humides ou liquides résultant de l'activité humaine boues de stations d'épuration, fraction organique des déchets ménagers, etc.

Le mélange gazeux produit, appelé **biogaz**, est utilisé pour générer de l'électricité, de la chaleur, ou peut même servir de carburant dans les véhicules.

Exemples

- La station d'épuration de Bruxelles-Nord, le long du canal de Willebroek, traite les eaux usées pour un équivalent de 1.100.000 habitants, soit 325.000 m³ d'eaux usées par jour en moyenne. Les boues résultant du processus d'épuration sont traitées par biométhanisation et génèrent du biogaz. Ce dernier est valorisé dans une unité de cogénération produisant de l'électricité, de la vapeur et de l'eau chaude. La vapeur est employée dans le processus d'épuration de l'eau (hydrolyse thermique) tandis que

l'eau chaude est utilisée pour le chauffage des locaux. L'électricité produite est utilisée pour alimenter la station d'épuration, le surplus est vendu au réseau.

- Les bus urbains de Lille et de Stockholm roulent en grande partie avec du biogaz issu de la biométhanisation des boues de station d'épuration et/ou de la fraction organique des déchets ménagers (Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement, 2009).



Chapitre III

Déchets des industries alimentaires



1. Définition des déchets

Le déchet est défini par sa destination bien plus que par sa nature, indiquant qu'au regard du législateur tout produit peut être considéré comme un déchet et qu'à l'inverse tout déchet peut devenir un produit (Moletta, 2006).

2. Différents types des déchets de l'industrie alimentaire

Les industries agroalimentaires sont les principales activités industrielles génératrices de boues et de déchets organiques (Masero, 2010).

2.1 Effluents des industries alimentaires

Les effluents bruts de l'industrie de transformation des aliments montrent une concentration extrêmement élevée en matières organiques biodégradables (Malagié et al, 2000). Ces rejets liquides sont essentiellement caractérisés par leur charge importante en matière organique.

2.1.1 Paramètres permettant d'apprécier la qualité des effluents

Les paramètres qui permettent d'apprécier la qualité des effluents sont prioritairement les suivants (Moletta, 2006) :

- **Matières en suspension (MES)**

Qui représentent la fraction non dissoute des effluents.

- **Demande chimique en oxygène (DCO)**

Qui caractérise la pollution oxydable totale. Elle est appréciée par la mesure de la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les matières contenues dans l'effluent.

On distingue la DCO_s qui est la soluble et la DCO_t qui est la mesure totale qui comprend donc aussi les matières en suspensions.

- **Demande biochimique en oxygène (DBO₅)**

Qui correspond à la quantité de la pollution facilement biodégradable et se mesure par la quantité d'oxygène consommée en cinq jours par les micro-organismes contenus dans l'effluent pour oxyder une partie des matières carbonées.

- **Matières oxydables (MO)**

Ce paramètre est un des coefficients spécifiques de pollution utilisée par les agences de l'eau dans le calcul de la redevance pour détérioration de la qualité de l'eau (redevance pollution). Sa valeur est donnée par ma formule.

$$(DCO + 2DBO) / 3$$

A ces paramètres, il convient d'ajouter ceux qui sont relatifs à la teneur des effluents en azote et en phosphore, particulièrement lorsque le mode de traitement retenu pour ces effluents consiste en leur épandage sur des terres agricole.

2.1.2 Caractéristiques spécifiques de certaines activités agroalimentaires

- **Produits à base de viande**

Tableau III.1 : caractéristiques moyennes de production de la pollution pour les produits à base de viande exprimées en concentration dans l'effluent de sortie (exprimés en mg.L⁻¹)(Moletta, 2006).

| | |
|------------------------------|-------------|
| DBO₅ | 1700 |
| DCO | 3300 |
| MES | 700 |
| N(NTK) | 2.50 |
| P (tot) | 70 |
| Graisse (extrait sec) | 700 |
| Chlorures (CP) | 1000 |

- **Produit laitiers**

Tableau III.2 : caractéristiques moyennes de production de la pollution pour les produits a base de lait exprimées par concentration dans l'effluent (mg.L⁻¹ d'effluent)(Moletta, 2006).

| | Fromagerie avec récup. Sérum | Beure avec récup. Sérum | Collecte Et Stockage | Poudre de lait | Caséinerie | Lait de consommation et yaourt | Usine polyvalent |
|------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| DBO₅ | 2000 | 1000 | 1000 | 1600 | 2000 | 1200 | 850 |
| DCO | 3500 | 2000 | 2000 | 2800 | 3500 | 2000 | 1700 |
| MES | 500 | 300 | 600 | 400 | 500 | 500 | 350 |
| N(NTK) | 50 | 30 | 40 | 80 | 50 | 80 | 60 |

2.2 Rejets gazeux

En règle générale et à quelques exceptions près, la pollution atmosphérique due à l'industrie alimentaire est plus le fait d'odeurs désagréables que d'émissions toxiques dans l'air. C'est notamment pour cette raison que, dans de nombreuses villes, la localisation des abattoirs est régie par des codes sanitaires. Leur éloignement des habitations permet, certes, de réduire les récriminations des citoyens contre les odeurs, mais il n'en supprime pas pour autant cette nuisance malodorante. Il est parfois nécessaire de mettre en place des absorbeurs ou des épurateurs.

Les fuites d'ammoniac qui peuvent se produire dans les installations de réfrigération constituent un grave problème de santé publique. Ce gaz irrite fortement les yeux et les voies respiratoires. Un important rejet dans l'atmosphère peut nécessiter l'évacuation des habitants de la zone touchée. Un plan de maîtrise des fuites et des mesures d'urgence s'imposent.

Les industries alimentaires qui utilisent des solvants (par exemple, pour l'extraction des huiles alimentaires) peuvent dégager des vapeurs dans l'atmosphère. La production en circuit fermé et le recyclage des solvants sont les meilleures solutions pour y remédier. Les secteurs qui, comme dans le cas du raffinage du sucre de canne, utilisent de l'acide sulfurique ou d'autres acides peuvent produire des substances contaminantes telles que des oxydes de soufre. Des moyens de lutte, parmi lesquels les épurateurs, devraient être mis en œuvre (Malagié, et al, 2000).

2.3 Déchets solides

La part de déchets solides peut être considérable, par exemple dans la production de tomates en boîtes, elle peut représenter de 15 à 30% de la quantité totale traitée. Dans le cas des petits pois et du maïs, elle atteint 75% (Malagié, et al, 2000).

On peut classer les déchets solide en 4 classes :

2.3.1 Déchets dangereux

Un déchet dangereux est défini dans l'annexe III de la directive 2008/98/CE modifiée par le règlement UE n° 1357/2014 comme un déchet qui présente une ou plusieurs des propriétés de dangers énumérées. Ce sont des déchets qui contiennent en quantités variables des éléments toxiques pour la santé humaine et/ou l'environnement (Balet, 2016).

Les déchets dangereux doivent être éliminés dans des installations spécifiques et de manière conforme.

2.3.2 Déchets d'emballage

Les déchets d'emballages (carton, bois, plastique et métalliques) sont des déchets plus légers, plus recyclables.

2.3.3 Boues

L'épandage des boues est soumis à une réglementation spécifique dont les dispositions applicables prévoient notamment la réalisation de :

- une étude préalable comprise dans l'étude d'impact montrant l'innocuité et l'intérêt agronomique des effluents ou des déchets, l'aptitude du sol à les recevoir, le périmètre d'épandage... ;
- un programme prévisionnel annuel d'épandage incluant un « plan d'épandage » ;
- un cahier d'épandage (à conserver pendant 10 ans, tenu à jour et à disposition de l'inspection des ICPE),
- un bilan annuel.

2.3.4 Déchets organiques

Sont des Déchets banals biodégradables qui proviennent soit des rebuts des aliments (biscuits, chocolat, invendus périmés, pulpe de fruits...), soit des fruits et légumes flétris ou abîmés, retraits alimentaires périmés ou abîmés, emballés ou non)(Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 2011).

Ces déchets peuvent être valorisés dans des filières différentes (alimentation animale, valorisation agronomique avec ou sans compostage ou énergétique(Méthanisation) ou incinération avec valorisation Energétique).

Deux caractéristiques importantes des déchets organiques sont à prendre en compte : leur forte fermentescibilité et leur saisonnalité dans certains secteurs d'activités (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, 2011).

3. Gestion des déchets

L'approche internationalement acceptée de la hiérarchie du management des déchets aide les établissements alimentaires à prioriser les pratiques de gestion des déchets afin de traiter les déchets de manière durable. Elle établit l'ordre de préférence des options de gestion des déchets, de la plus préférée jusqu'à la dernière. La prévention des déchets est la préférée et souvent l'option la moins coûteuse (Professional Evaluation and Certification Board, 2014).

La Directive Cadre des Déchets européenne prévoit une hiérarchisation de la gestion des déchets à 5 niveaux qui sont les suivantes (figure III.1) :

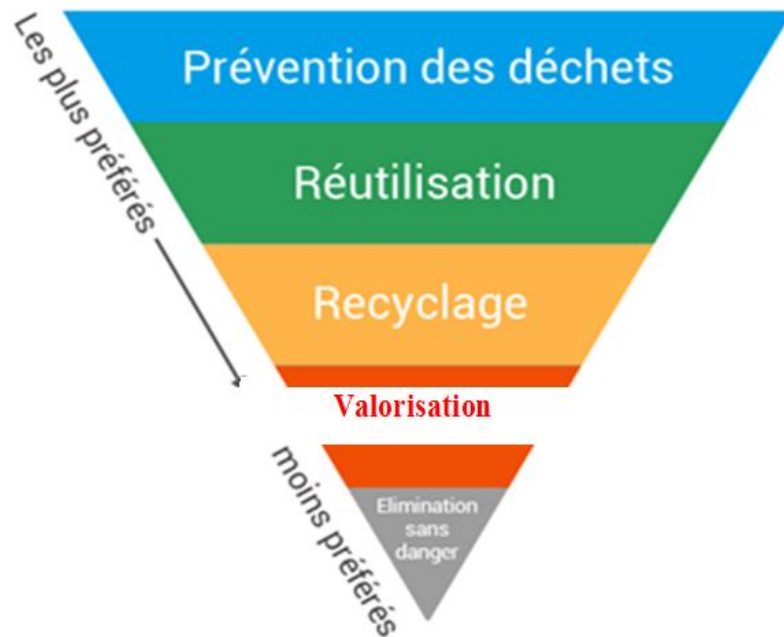


Figure III.1 : Hiérarchie de la gestion des déchets.

3.1 Prévention des déchets

C'est-à-dire éviter d'en produire. Cela peut se faire, par exemple :

- Optimisant le processus de fabrication.
- Utiliser des matières premières recyclées. La production de certaines matières premières génère de grandes quantités de déchets. En utilisant des matières premières recyclées, on peut réduire cette montagne de déchets.

3.2 Réutilisation

Par exemple, par réintégration des chutes dans la chaîne de production.

3.3 Recyclage

Par exemple, par recyclage industriel (c'est le cas des déchets d'emballages (papier, métaux, verre et plastiques), et aussi des huiles et des solvants, etc.). Le recyclage permet d'obtenir des matériaux moins coûteux que le produit naturel (Balet, 2016).

3.4 Valorisation des déchets qui n'ont pu être évités ou recyclés

C'est-à-dire leur trouver une nouvelle utilité. Par exemple :

- la valorisation agricole (alimentation animale, épandage, etc.) ;
- La valorisation énergétique (incinération, méthanisation) La valorisation de déchets et résidus organiques à des fins de production d'énergie, est généralement pratiquée localement, au niveau des agro-industries et des fermes agricoles, en milieu périurbain et rural. Cette pratique est souvent favorisée par une surabondance de résidus ayant des propriétés agronomiques relativement pauvres (Lacour, 2012).

3.5 Élimination des déchets

Par combustion en incinérateur (si une partie de l'énergie est récupérée, on parle de valorisation énergétique). Aucune forme d'incinération de déchet n'est permise en dehors des incinérateurs autorisés par les autorités régionales. Par la mise en centre d'enfouissement technique (décharge). Ces opérations sont réalisées dans des installations autorisées par les autorités régionales. Toute entreprise est tenue de gérer les déchets produits selon la réglementation en vigueur et les prescriptions indiquées dans son permis d'environnement. Il est, donc, interdit de brûler ses déchets ou de les enfouir sur place.

Le tableau III.3 donne des exemples sur la valorisation des déchets des industries alimentaires.

Tableau III.3 : Exemples de valorisation de sous-produits des industries alimentaires (Malagié et al, 2000).

| Méthode | Exemples |
|-----------------------------|---|
| Digestion anaérobie | Digestion par des populations mélangées de bactéries dégageant du méthane et du CO ₂ <ul style="list-style-type: none"> Marc de pommes, pulpe d'abricots, déchets de pêches et de poires, pelures d'oranges |
| Alimentation animale | Utilisation directe, à l'état pressé ou desséché, comme fourrage (ensilage) ou comme complément alimentaire <ul style="list-style-type: none"> Grande variété de déchets issus du traitement des fruits et des légumes Pailles de céréales additionnées d'une substance caustique destinée à en améliorer la digestibilité |
| Compostage | Procédé microbiologique naturel permettant la décomposition de matières organiques dans des conditions aérobies contrôlées <ul style="list-style-type: none"> Résidus de brasserie déshydratés Grande variété de déchets de fruits et de légumes Résidus gélatineux |
| Fibres alimentaires | Valorisation des déchets organiques solides par filtration et hydratation <ul style="list-style-type: none"> Fibres de marc de pommes ou de poires utilisées en boulangerie et dans l'industrie pharmaceutique Balles d'avoine et d'autres céréales |
| Fermentation | Mélange d'amidon, de sucre et de substances alcoolisées <ul style="list-style-type: none"> Biomasse (déchets agricoles, bois, ordures ménagères) destinée à la production d'éthanol Résidus de pommes de terre destinés à la production de méthane Sucre provenant de l'amidon de maïs destiné à la production de matières plastiques biodégradables |
| Incinération | Utilisation de la biomasse en tant que combustible <ul style="list-style-type: none"> Noyaux, feuilles, noix, coquilles et branches élaguées destinés à la combustion ou à la production combinée d'électricité et de chaleur |

| | |
|----------------------------|--|
| Pyrolyse | Transformation des coquilles de fruits secs et des noyaux de fruits en briquettes de charbon de bois <ul style="list-style-type: none">• Noyaux de pêches, d'abricots et d'olives, coques d'amandes et coquilles de noix |
| Amendement des sols | Application sur les sols de fertilisants pauvres en nutriments et en matières organiques <ul style="list-style-type: none">• Pêches, poires, tomates |



Chapitre IV

Industries sucrières



1. Introduction

Le sucre est aujourd'hui un article de consommation de première nécessité, ce nutriment de la famille des glucides est indispensable à notre organisme, auquel il procure l'énergie nécessaire à son fonctionnement. Il entre dans beaucoup de nos aliments et boissons du petit déjeuner jusqu'au diner. La valorisation de la consommation de cette denrée fut rendue possible grâce à la découverte de la betterave dès le XVIIIe siècle (Ouerfelli, 2008).

2. Présentation des industries sucrières

La **sucrerie** est principalement une **industrie de séparation et de purification**, du début de la filière à la production du sucre final, l'objectif des sucreries est de partir d'une matière première la plus pure possible et de produire, avec un rendement optimum, un sucre de qualité (Decloux, 2002).

3. Production du sucre

Le sucre (saccharose) est produit à partir de la betterave sucrière ou de la canne à sucre (Decloux, 2002). La principale source pour obtenir du sucre reste la betterave, qui donne 16% de son poids en sucre (Willay, 2010). Le tableau IV.1 composition moyenne de betterave en sucre.

Tableau IV.1 : composition moyenne de betterave en sucre (Arzate, 2005).

| Composant | Teneur (%) |
|-----------|------------|
| Eau | 75.9 |
| Sucre | 16.0 |
| Pulpe | 5.5 |
| Non-sucre | 2.6 |
| Total | 100.0 |

Les procédés de production du sucre à partir de la betterave et de la canne à sucre diffèrent sur plusieurs points (Decloux, 2002). Nous avons choisi, pour plus de clarté, de centrer cette présentation sur la production de sucre à partir des betteraves.

Un grand nombre d'opérations unitaires de séparation sont ainsi mises en œuvre, en sucrerie de betterave (Decloux, 2002), Chacune des étapes présentées au schéma de procédé (Figure IV.1 et Figure IV.2).

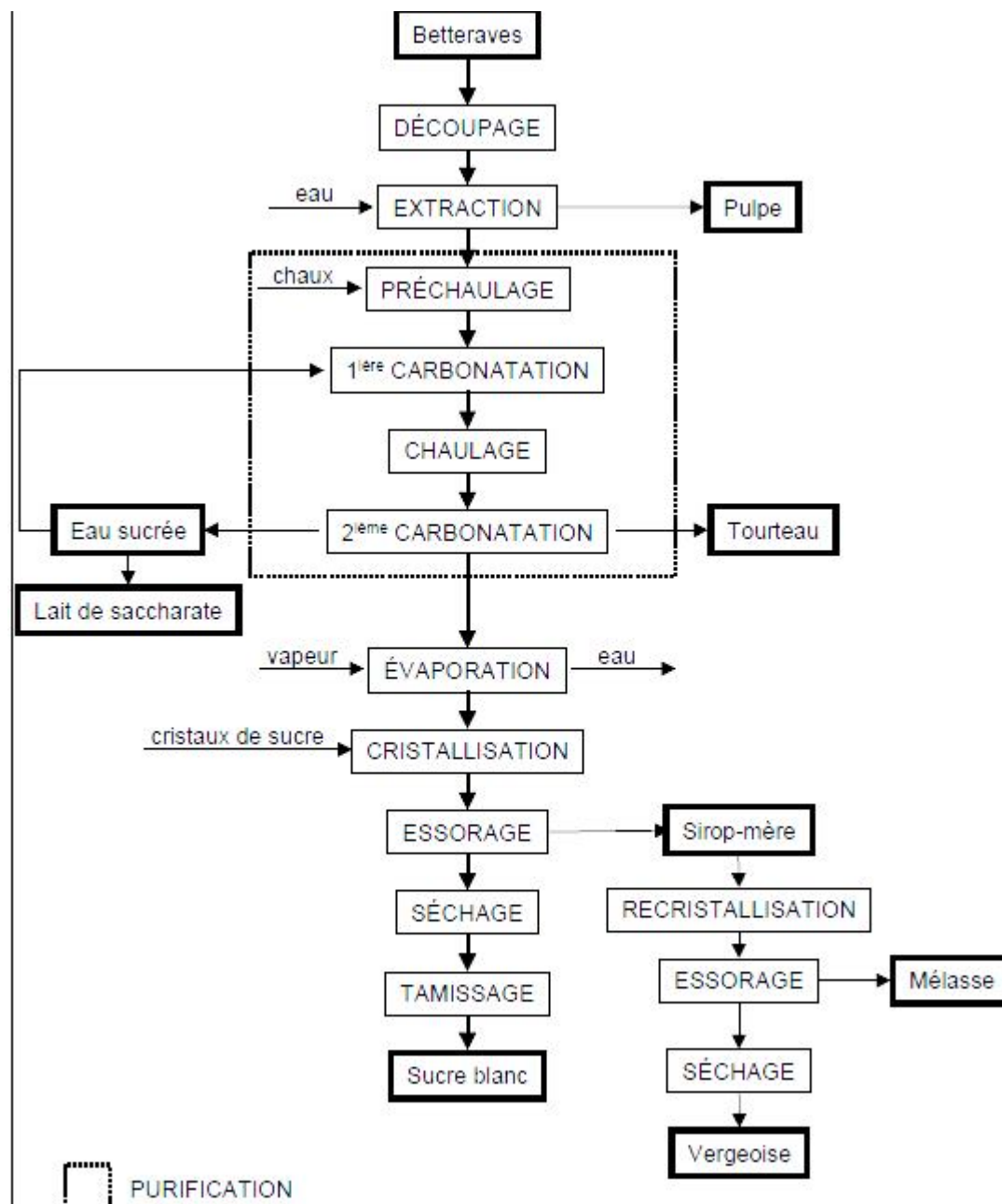


Figure IV.1 : schème de procédé de production en sucrerie de betterave (Arzate, 2005).

La production de sucre blanc correspond à 83,1 % du contenu en sucre dans la betterave sucrière. On en perd environ 12,5 % dans la mélasse. On note aussi d'autres pertes, telles que le sucre restant dans la pulpe après l'extraction, dans le tourteau de chaux après le lavage et dans les filtres rotatifs sous vide. Des pertes sont également dues à l'action bactérienne, au renversement de liquides tout au long du procédé, à l'inversion du sucre et à la caramélisation du sucre par exposition aux surfaces chaudes dans le procédé (Arzate, 2005).

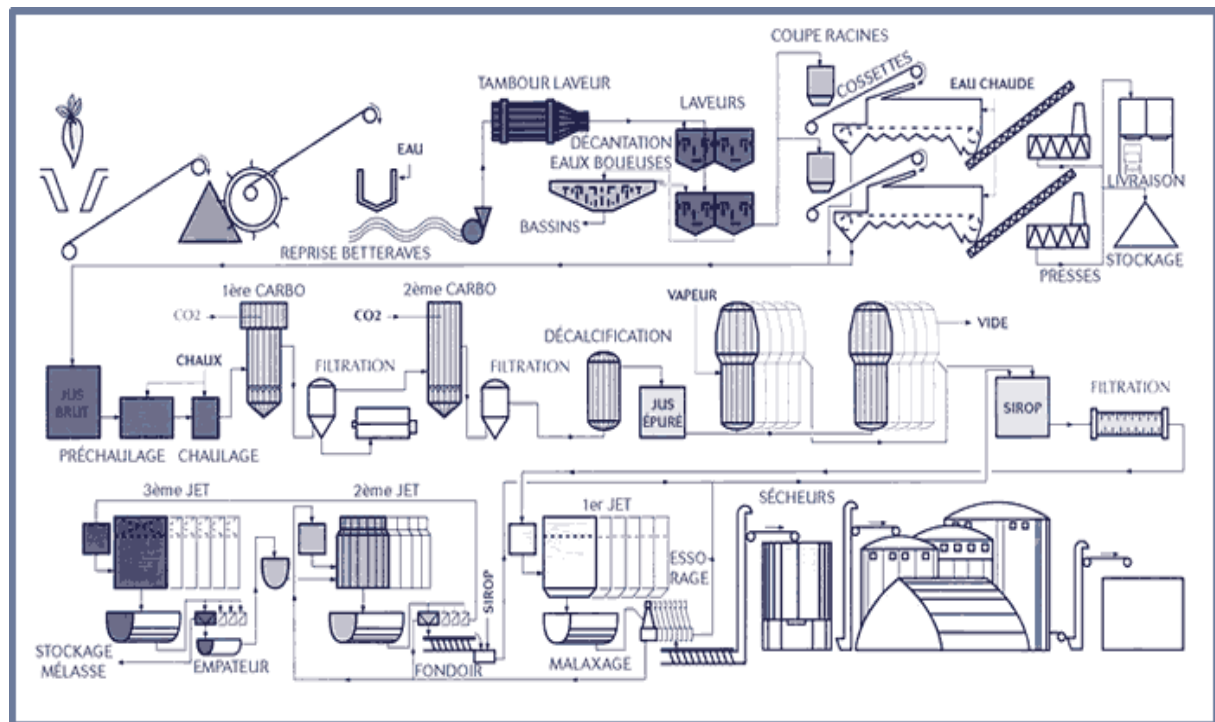


Figure IV.2 : Schéma de fabrication du sucre de betterave (Institut de conseil et d'études en développement durable Wallon, 2007).

Exemple

En Belgique, la campagne sucrière débute fin septembre par l'arrachage des betteraves et dure entre 85 et 105 jours. Une tonne de betterave va donner 145 kg de sucre (Institut de conseil et d'études en développement durable Wallon, 2007).

4. Déchets de sucrerie de betterave

Les déchets de production représentent en moyenne près de 98,5% du flux de déchets, ils sont presque entièrement valorisés. Les autres déchets proviennent en grande partie des activités de maintenance et constituent un gisement disparate de déchets générés en très faibles quantités, soit environ 1,5% de l'ensemble du flux.

Les principaux déchets de production sont les suivants :

- Les pulpes de betteraves (les pulpes humides, les pulpes sur pressées (77%) et les pulpes sèches);
- Les mélasses, vergeoise et vinasses;
- Les écumes de sucrerie;
- Les herbes et radicelles.

Les trois types de déchets (pulpes, écumes et des herbes et radicelles) représentent 78% du gisement de déchets de production (Institut de conseil et d'études en développement durable Wallon, 2007).

5. Gestion des déchets

5.1 La prévention des déchets

- Afin de conserver leur richesse en sucre, les betteraves doivent être transformées

rapidement, car une fois extraites du sol leur teneur en sucre diminue rapidement. C'est pour cette raison que les sucreries sont implantées à proximité des zones de culture, dans un rayon de 30 km en moyenne. Dès leur récolte, les betteraves passent à travers différentes étapes avant de se rendre à la sucrerie (Arzate, 2005).

- Réduction du temps d'entreposage, Pendant l'entreposage, la betterave subit une perte de sucre due à sa respiration (200 à 400 g de sucre/tonne de betterave par jour). Cette perte dépend du temps d'entreposage, de la température de la racine et de la variété de betterave. La température doit donc être maintenue légèrement au-dessus du point de congélation afin de réduire la respiration de la plante et en conséquence la fermentation et l'échauffement du silo, ce qui induit une plus grande difficulté d'extraction du sucre en usine. De plus, le gel et le dégel du silo favorisent la dégradation de la betterave facilement identifiable par une coloration noire. Ces dégradations produisent, par exemple, des polysaccharides tels que les dextrans ou les lévanes qui rendront les étapes de purification et de filtration plus difficile. Les matières azotées sont aussi transformées avec hydrolyse des protéines en acides aminés. Ce taux d'azote soluble supplémentaire diminue la pureté des jus, et par la même augmente la perte en saccharose (chaque composante non sucrée entraîne une quantité donnée de saccharose dans la mélasse) (Arzate, 2005).
- Les cossettes mesurant environ 0,9 à 1,3 mm d'épaisseur et de 5 à 6 cm de longueur assurent une surface maximale pour l'extraction du jus par diffusion (Arzate, 2005).
- L'amélioration du procédé d'extraction du sucre, Des recherches sont réalisées afin d'améliorer la séparation des composants non-sucrés et, par conséquent, le rendement du procédé d'extraction. Ces études sont basées sur l'évaluation de la performance des techniques d'ultrafiltration et de nano filtration, ainsi que d'électrodialyse (Šereš, et al., 2005).
- Des techniques pour éliminer la pulpe et réduire de façon sensible la coloration des jus épurés, ainsi que la teneur en sels de chaux ont été aussi développées (Grabka, et al., 2001)
- la récupération du sucre à partir de la mélasse peut être considérée comme une étape complémentaire du procédé. (Arzate, 2005).

5.2 Recyclage

L'eau qui sert au lavage à l'usine est elle-même recyclée pour irriguer les parcelles (www.cirad.fr).

5.3 Valorisation

5.3.1 Pulpe

La pulpe est une partie tendre et riche en éléments nutritifs qui sert à l'alimentation animale et la production d'énergie par combustion (Arzate, 2005).

5.3.2 Feuilles, herbes et radiceles

- Les feuilles servent à fabriquer de l'engrais pour les champs (Arzate, 2005).
- Les herbes et radiceles sont valorisées en alimentation animale (Institut de conseil et d'études en développement durable Wallon, 2007).

5.3.3 Écumes

Les écumes sont produites lors de la clarification des jus et constituées essentiellement de carbonate de calcium. Elles sont valorisées comme amendement du sol (Institut de conseil et d'études en développement durable Wallon, 2007).

5.3.4 Cendres

Les cendres riches en silice obtenues lors de la combustion des déchets et qui fertilisent à souhait les plantations de betterave, tout comme la vinasse (riche en potassium et azote) et la mélasse (riche en hydrates de carbone stimulant la croissance des micro-organismes).

5.3.5 Mélasse

La mélasse est un sous-produit de l'industrie sucrière, résidu non cristallisable et visqueux, constitué de substances sirupeuses demeurant dans les cuves après extraction de la majeure partie des sucres par cristallisation et centrifugation (Grosclaude, 2015). La mélasse contient entre 40 % et 69 % de saccharose, du sucre inverti et des composants inorganiques non-sucrés.

➤ **Modes de valorisation actuels**

- La mélasse est essentiellement transformée en rhum industriel, mais elle peut également être utilisée pour l'alimentation animale.
- La technologie industrielle de production de rhum (fermentation et distillation) étant très proche de celle de la production d'éthanol, la valorisation de la mélasse sous forme d'éthanol carburant (bioénergie) (Grosclaude, 2015).
- La production de levures de boulangerie (Arzate, 2005).
- La production des **bioplastiques** qu'ils peuvent être produits à partir de l'éthanol (provenant lui-même du sucre) ou à partir de la mélasse (www.cirad.fr).

5.3.6 Vergeoise

La vergeoise est un sucre brun foncé, utilisé pour la préparation de quelques aliments par exemple pour la préparation des spéculoos, provenant d'un sirop de betterave, après affinage.

5.3.7 Vinasses

- Les vinasses peuvent être utilisées pour la production de biogaz ;
- Les vinasses sont généralement valorisées comme fertilisant (apport en potassium) pour les cultures cannières ;
- Un procédé a été développé par une distillerie de la Guadeloupe dans le but de réduire la charge polluante des vinasses. Il consiste à filtrer les vinasses sur terre d'infusoire, afin d'absorber la matière organique qu'elles contiennent. L'adsorbat est extrait au moyen d'un solvant apolaire, le cyclohexane, afin de récupérer les cires brutes. Le rendement de l'extraction est d'environ 7%. Les cires sont utilisées dans l'industrie pharmaceutique et cosmétique (Boucherba, 2015).

5.3.8 Eau usée

- La valorisation des eaux résiduares de fermentation et de distillation (vinasses et fonds de cuve) sous forme de biogaz par méthanisation pour la production d'énergie (d'électricité et/ou de chaleur) leur confère une réelle valeur ajoutée.
- D'autres techniques de traitement et valorisation des eaux usées (riche en vinasses), notamment par lagunage voire compostage des boues, pour leur épandage comme amendement organique une fois traitées (il est interdit de rejeter les vinasses sans traitement préalable car elles présentent des risques de pollution en particulier par eutrophisation des milieux)(Grosclaude, 2015).

6. Production de bioénergie

On peut valoriser les déchets de l'industrie sucrière pour la production d'énergie par différentes méthodes:

- Combustion des déchets et production d'énergie (électricité ou/et chaleur).
- Production de biocarburant de deuxième génération (biogaz par fermentation méthanique, bioéthanol par fermentation alcoolique).

Dans notre cas on va détailler l'utilisation de la mélasse pour la production de biocarburant de 2^{ème} génération (bioéthanol) par fermentation alcoolique.

6.1 Procède de fabrication de bioéthanol (fermentation alcoolique) à partir de la mélasse

Tableau IV.2 : composition chimique des mélasses de betterave et de canne

| | Mélasse normale de betterave | Mélasse de canne |
|--|------------------------------|------------------|
| Matière sèche (%) | 73 | 73 |
| Matières minérales (% MS) | 13 | 14 |
| Matières azotées totales (% Ms) | 15 | 6 |
| Sucres totaux (% MS) | 64 | 64 |
| Calcium (g/Kg MS) | 3.7 | 7.4 |
| Phosphore (g/Kg MS) | 0.3 | 0.7 |
| Potassium (g/Kg MS) | 82 | 40 |

La teneur en sucres totaux est sensiblement la même, quelle que soit l'origine de la mélasse, betterave ou canne (entre 59 et 70% de la MS), mais présente quelques écarts suivant le procédé industriel appliqué aux mélasses de betteraves.

En revanche, suivant l'origine des mélasses, betteraves à la canne, si la teneur en sucres est voisine, la composition de ces sucres totaux est très différente. Ainsi, dans la mélasse de betterave, la presque totalité des sucres se trouve sous forme de saccharose, alors que dans la mélasse de canne, le saccharose ne représente qu'environ les 2/3 des sucres totaux (30 à 40% du produit brut)(Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, 1991).

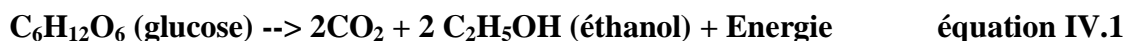
6.1.1 Souche utilisée

En général, les levures appartenant aux genres *Saccharomyces* sont les plus utilisées, malgré les nombreuses espèces de microorganismes connues pour leur capacité à fermenter les sucres en éthanol. En effet, les souches telles que *Saccharomyces cerevisiae* possèdent plusieurs avantages dont :

- La stabilité génétique.
- La capacité de fermenter le milieu le plus rapidement possible et produire de l'éthanol avec un rendement proche du rendement théorique.
- Peu exigeantes en facteur de croissance pour limiter les additions en vitamines aux milieux industriels.
- Haute tolérance à l'éthanol, afin de conserver une bonne viabilité en fin de fermentation.
- Croît rapidement, sur un substrat peu coûteux.
- Conserve dans le temps ses caractères biochimiques, sans risque de variations génétiques.

➤ **Caractéristiques de *Saccharomyces cerevisiae***

La levure saccharomyce utilise la respiration pour oxyder le glucose, elle extrait ainsi 40% de l'énergie contenue dans ce métabolite. Grâce à cette énergie, elle réalise ses travaux cellulaires et se reproduit par bourgeonnement. Mais elle utilise aussi la fermentation alcoolique qui, elle, n'extrait qu'environ 2% de l'énergie du métabolite. La fermentation alcoolique est une dégradation très incomplète du glucose puisqu'elle produit en plus du dioxyde de carbone, un résidu organique qui contient de l'énergie potentielle : l'éthanol. L'équation de l'oxydation incomplète du glucose au cours de la fermentation alcoolique est:



Dans les cultures de *Sacchromyces cerevisiae* développées en anaérobiose, seulement 10% du glucose est converti en biomasse et le restant est incorporé dans l'éthanol, le glycérol et le pyruvate, parfois même dans le succinate.

6.1.2 Paramètres influant la production d'éthanol -Biomasse

En fermentation alcoolique, plusieurs modèles cinétiques, expriment la croissance cellulaire en fonction de la concentration cellulaire par une relation linéaire. Les résultats expérimentaux démontrent qu'à de grandes concentrations cellulaires, la relation linéaire est incorrecte. Ceci apparaît vrai, car, à des concentrations cellulaires élevées, la disponibilité des éléments nutritifs en quantité suffisante pour la croissance et la production d'éthanol sera amoindrie. Par conséquent, les cellules de levure sont dégénérées petit à petit, diminuant ainsi la population viable en levure.

A-Substrat

Plusieurs études ont reporté qu'une concentration élevée en substrat montre un effet inhibiteur sur la croissance de la levure, ainsi, que sur la fermentation alcoolique.

Les levures utilisent plusieurs monosaccharides ou disaccharides comme substrat, et l'effet des sucres sont strictement contrôlé par les transporteurs de la membrane. Cependant, aux fortes concentrations en sucre, on observe l'existence d'une phase de latence plus ou moins marquée liée à l'adaptation des cellules au milieu traduisant l'inhibition par le substrat ainsi. Aussi l'accumulation du glucose a un rôle inhibiteur pour la saccharification lors de l'utilisation de céréales, il est peut être utile de réaliser les deux étapes (saccharification et fermentation) de manière simultanée. L'hydrolyse rapide du saccharose fait accumuler le fructose qui aboutit à l'augmentation de la pression atmosphérique, et comme résultat, la production d'éthanol baisse.

B-pH

Comme toutes les levures, *Saccharomyces cerevisiae* présente l'avantage de croître sur milieux acides pour lesquels la plupart des bactéries ne se développent pas. La fermentation alcoolique se déroule à un pH acide (pH 5 à 6). En milieu alcalin, le glycérol et l'acide acétique a tendance à s'accumuler au fur et à mesure que le pH augmente donc on préconise un pH de fermentation de 5. Comme au cours de la majorité des fermentations industrielles, la formation de CO₂ et d'acides organiques acidifie progressivement le milieu et empêche le développement des microorganismes, on utilise dans ce but :

- Des tampons tels que les phosphates mais dont le coût en limite l'emploi ou le carbonate de calcium largement utilisé dans les industries de fermentation. Ces produits sont employés généralement en excès et ils sont incorporés au milieu de culture dès le début de la fermentation ;
- Des agents neutralisants peu coûteux tels que l'acide chlorhydrique, ou les lessives de soude ou l'ammoniaque, ce dernier produit pouvant en plus servir d'aliment azoté aux micro-organismes capables de l'utiliser.

C-Aération

Les levures peuvent se développer en présence ou en absence d'oxygène, la présence de ce dernier augmente néanmoins le rendement de la fermentation. L'oxygène intervient, non pas au niveau d'un métabolisme respiratoire mais au niveau de la biosynthèse de constituants de la biomasse dont les mieux identifiées sont les stérols et les acides gras insaturés. Pour éviter que le métabolisme de la levure soit perturbé une légère aération du système de fermentation est indispensable. La fermentation alcoolique produit des quantités importantes de dioxyde de carbone (CO₂), qui étouffent la levure. L'aération fait diminuer la concentration en CO₂ dans la culture. Cependant, l'apport en oxygène ne doit pas être élevé, car une aération intense fait augmenter la concentration en biomasse et diminue le rendement de production d'éthanol.

D-Produit

Parmi les facteurs responsables de l'arrêt de la fermentation, l'éthanol est certainement l'un des plus importants. L'éthanol inhibe l'activité de l'hexokinase, enzyme qui assure la première réaction de la glycolyse. L'éthanol agit sur le transport des nutriments (acides

aminés, glucose) : il pénètre dans la membrane cytoplasmique et modifié sa fluidité, ce qui aboutit au dysfonctionnement de l'ATPase, ainsi, l'énergie nécessaire au bon fonctionnement des perméases ne pourra plus être assurée ; l'une des autres conséquences de l'action de l'éthanol est la dissipation du gradient électrochimique de protons au niveau de la membrane cytoplasmique. Le pH interne de la cellule n'est plus régulé. Cependant, l'effet de l'éthanol varie selon les souches de levure utilisées et les multiples manipulations génétiques vont dans le sens d'améliorer leur tolérance vis-à-vis de l'éthanol.

E-Température

La température exerce un effet déterminant sur l'ensemble des activités cellulaires du micro-organisme. Selon les travaux de Navarre (1988), l'action de la température sur les levures est multiple :

Les levures sont incapables de se multiplier au-dessous de 10°C. Elles peuvent cependant supporter sans inconvénient, des températures beaucoup plus basses lorsqu'elles sont à l'état de spores-Leur résistance vis-à-vis de la chaleur est différente, suivant qu'elles sont à l'état sec ou humide :

-Etat humide : Lorsque la température atteint 20°C la prolifération des levures s'accélère, sans passer par un maximum vers 30°C. Au-dessus de 35°C, leur activité diminue rapidement ; la fermentation risque de s'arrêter.

-Etat sec : Les levures sont beaucoup plus résistantes (5 minutes à la température de 115- 120 °C).La température optimale pour un bon rendement en éthanol est 30°C(Boucherba, 2015).

6.1.3 Voie biochimique

La voie biochimique désigne la filière de valorisation de la biomasse par hydrolyse puis fermentation. Le produit final principal est l'éthanol. Il est de même nature que le bioéthanol de première génération produit à partir de plantes sucrières ou céréalières telles que le maïs et le blé. Néanmoins, si la filière bioéthanol de première génération est à un stade avancé de maturité technologique, celle de seconde génération se heurte encore à des difficultés techniques et économiques liées à la matière à valoriser:

– certains sucres (2à4% du produit brut) ne sont pas fermentescibles (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, 1991).

Afin de répondre à ces considérations, le procédé de production est articulé autour de quatre étapes principales :

- prétraitement de la matière première afin d'en libérer la fraction hydrolysable ;
- cassure par hydrolyse des molécules de cellulose et d'hémicellulose en sucres, respectivement hexoses (glucose) et pentoses ;
- fermentation des sucres en éthanol ;
- séparation de l'éthanol du moût de fermentation, distillation et séchage afin d'obtenir de l'éthanol anhydre, apte à un usage comme biocarburant (Broust, et al., 2013).



Conclusion générale



Conclusion générale

L'étude réalisée concerne la gestion des déchets des industries alimentaires. Elle concerne la valorisation de ces déchets pour la production de bioénergie.

La valorisation énergétique des déchets agro-industriels est en développement. Les industriels qui génèrent des déchets combustibles ou fermentescibles sur leurs sites de production s'intéressent à leur valorisation énergétique.

Les biocarburants de deuxième génération s'inscrivent dans un contexte de complémentarité à l'offre actuelle des biocarburants de première génération. En effet, la première génération ne peut pas satisfaire, à elle seule, tous les besoins. En outre, la biomasse qui est utilisée pour la production de biocarburants de deuxième génération n'entre pas en compétition directe avec des usages alimentaires.

De nos jours, la recherche sucrière porte sur les domaines de l'économie d'énergie, de l'optimisation de procédé de production et du traitement des rejets.

Des techniques de valorisation énergétique des déchets des industries sucrières sont en plein essor ; l'utilisation de la mélasse pour la production de biocarburants telle que la production de bioéthanol par fermentation alcoolique a connu un grand développement dans le monde.

Bibliographie

Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME)., Les dechetes alimentaires, premiers pas vers la reduction et la valorisation, Toulouse, (2011). www.ademe.fr

Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME)., Réduire et valoriser les déchets, les choix gagnants, Industries agricoles et agroalimentaires, France, 8p. www.ademe.fr

Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie (ADEME)., mélasse de betterave et de canne, Paris, (1991). www.ademe.fr

Agence de développement et de promotion économique de la région centre, Les industries agroalimentaires en région Centre, Paris, (2012). www.centrecoproregioncentre.fr

Arzate A., Extraction du sucre de betterave, Rapport de centre de recherche de developpement et de transfert technologique en acériculture, Saint-Norbert d'Arthabaska, (2005).fr.scribd.com

Balet J-M., Gestion des déchets, Paris: Dunod, 5 éme edition, (2016) 324p.

Bauduin P., En savoir plus sur la bioénergie, Areva, Paris, (2014). www.areva.com

Bayard R., Gourdon R., Traitement biologique des déchets, Technique d'ingenieur, J3966 V1, (2007) 26p.

Boucherba N., Valorisation des résidus agro-industriels, cours, Algérie: Université Abderrahmane Mira de Béjaïa Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département de Microbiologie, (2015).

Bournay L., Heraud J-P., Pierron A-C., Production de biokérosène et de biogazole par la voie thermochimique, Technique d'ingenieur , IN303 V1, (2016).

Broust F., Girard P., Van de steene L., Biocarburants de seconde génération et bioraffinerie. Technique d'ingenieur , RE110 V2, (2013) 19p.

Cherif E., Le marchie des industries alimentaires en algerie, Agroligne, N°97, (2015), www.agroligne.com

Decloux M., Procédés de transformation en sucrerie (partie 1). Technique d'ingenieur , F 6150 V1, (2002).

Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement, La biomasse et la bioenergie (er 12), (2009).

Institut de conseil et d'études en développement durable asbl., Situation environnementale des industries: L'industrie de la transformation de la betterave et de la chicoree. Wallon , (2007). Rapport Sucre 2007.doc

Bibliographie

- Gagnepain B.**, Biocarburants, Technique d'ingénieur, BE8550 V3, (2016) 30p.
- Grabka J., Baryga A.**, Preliming of raw juice by calcium carbonate suspensions, Agris since, Poland, Vol.92, N°4, (2001).
- Grosclaude J.Y.**, Valorisation de la Biomasse en Guadeloupe, CGAAER, (2015).
- Knothe G., Gerpen J. V., Krahl J.**, The Biodiesel Handbook, United States of America: Aocs press, (2005) 286p.
- Lacour J.**, Valorisation de résidus agricoles et autres déchets organiques par digestion anaérobie en Haïti. Thèse de Doctorat: Ecole doctorale Chimie de Lyon (Chimie, Procédés, Environnement): France, 2012.
- Latrille É., Trably É., Larroche C.**, Production de biohydrogène : voie fermentaire sombre. Technique d'ingénieur , BIO3351 V1, (2011) 27p.
- Ma F., Hanna M.A.**, Biodiesel production, Bioresource Technology , Vol.70, N°1, (1999) 1-15.
- Malagié M., Jensen G., Graham J., Smith D. L.**, Encyclopédie de sécurité et de santé au travail, Genève: International labour organization, (2000).
- Marchetti J. M., Miguel V. U., Errazu A. F.**, Possible methods for biodiesel production, Renewable and Sustainable Energy Reviews , Vol. 11, (2007) 1300-1311.
- Masero J.**, Une bonne gestion des déchets organiques, Agreste Primeur,N° 245, (2010) 4p.
- Ministère de l'agriculture et de la pêche**, Réflexions sur la valorisation, France, (2006) 55p. www.oestv.com
- Moletta R.**, Gestion des problemes environnementaux dans les industries agroalimentaires, Paris: TEC & DOC, (2006).
- Ouerfelli M.**, Le sucre: Production, commercialisation et usages dans la Méditerranée médiévale. Leyde-Boston: Brill, (2008).
- Professional Evaluation and Certification Board (PECB)**, Waste mangement in food industry, (2014) 3p, www.pecb.com
- Pasquiou V., Randimbivololona P., Dunod A., Lepage A.**, Etude sur la valorisation des déchets agro-industriels pour la production de chaleur et d'électricité en Afrique subsaharienne, France : entertime; ecosur afrique, 2012.
- Šereš Z., Gyura J., Ezterle M., Djuric M.**, Separation of non-sucrose compounds from syrup as a part of the sugar-beet production process by ultrafiltration with ceramic membranes, Springer, Vol. 223, N°6, (2006) 829-835.

Bibliographie

Syndicat des énergies renouvelables (SER), France biomasse énergie (FBE), Le syndicat des énergies renouvelables au service de la filière des bioénergies, Paris, (2015). www.enr.fr

Willay A., L'essor de l'industrie sucrière à Béthune au 19^{ème} siècle, (2010).

<http://www.cirad.fr/actualites/toutes-les-actualites/communiqués-de-presse/2015/canne-a-sucre>