

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université M'HAMED BOUGARA Boumerdès



**FACULTÉ DES SCIENCES**

**Domaine : Sciences de la matière**

**Département de Chimie**

**Filière : Chimie**

**Spécialité : Chimie et Environnement**

**Mémoire**

*Présenté dans le cadre de l'obtention du diplôme de Master en Chimie  
et Environnement*

**Thème**

**Production de bioethanol à partir des déchets de  
l'industrie de transformation de pomme de terre**

**Présenté par**

**Fouad BOUNOUA**

**Devant le jury :**

<b>Mr HAMMADI Mohamed</b>	<b>Professeur (UMBB)</b>	<b>Président</b>
<b>Mr BOUNOUGHAZ Moussa</b>	<b>Professeur (UMBB)</b>	<b>Co-Promoteur</b>
<b>Mme LABRAOUI Karima</b>	<b>Maître de Conférences B (UMBB)</b>	<b>Examinatrice</b>
<b>Mme BOUDIEB Naima</b>	<b>Maitre Assistante A (UMBB)</b>	<b>Examinatrice</b>
<b>Mme ABADA Sabah</b>	<b>Maître de Recherche B (CDER)</b>	<b>Promotrice</b>

**Juillet 2017**

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à mes parents, à ma petite famille et à ma  
grande famille*

## *Remerciements*

Je remercie ALLAH le Tout-puissant pour m'avoir donné le courage, la volonté et la patience à fin de mener à terme le présent travail.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

En premier lieu, Je tiens vivement à exprimer ma profonde reconnaissance et gratitude à mes promoteurs : Mr M. BOUNOUGHAZ Moussa, Professeur à l'université de Boumerdes et Mme S. ABADA, Maître de recherche B au niveau du CDER qui, avec leurs expériences, m'ont guidé le long de la réalisation de ce travail. Leur conseils et recommandation ont été précieux pour l'aboutissement de ce travail.

Je tiens aussi à remercier les membres de jury :

Mr HAMMADI Mohamed pour sa disponibilité, sa bienveillance et pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury.

Mme LABRAOUI Karima et Mme BOUDIEB Naima d'avoir accepter cette lourde charge en examinant le présent travail.

Je tiens également à exprimer mes profonds respects et remerciements à Mme C. Kouri du département de chimie, faculté des sciences pour sa générosité, son aide et son soutien.

Je me permets d'adresser mes remerciements aux personnels du laboratoire de biomasse et environnement du CDER pour leur soutien et disponibilité.

Enfin, ce travail n'aurait pas été mené à terme sans les concessions et les encouragements de mes parents, de ma petite et ma grande famille et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail, auxquels je dis tout simplement merci.

## ملخص

إنّ النفايات الناتجة عن الصناعة التحويلية للبطاطس تمثل مصدراً هاماً و الذي يمكن من تجميع النفايات الصناعية و تحويلها إلى طاقة متجددة مع التخلص من النفايات للمساهمة في حماية البيئة في إطار التنمية المستدامة. يدرس هذا العمل إنتاج الإيثانول الحيوي انطلاقاً من نشاء البطاطس الناتج من نفايات صناعة تحويل البطاطس إلى رقائق البطاطس. تمّ إخضاع نشاء البطاطس إلى عملية تمييه بواسطة محلول حمض الهيدروكلوريك (HCl) بتركيز 1 مول/لتر و نسبة مادة/حمض مساوية إلى 2:1 (وزن/ حجم) قبل أن يخمر بواسطة خميرة الجعة. سمح التمييه الحمضي بتحرير 159.3 غرام/ لتر من السكريات لإنتاج 54.3 غرام/ لتر من الإيثانول بعد التخمر. وأخيراً، تم استرجاع الإيثانول عن طريق التقطير والذي سمح بالانتقال من كحول 6.8 درجة إلى 93.4 كحول درجة. لقد أثبتت النتائج أنّ نشاء البطاطس الناتج من نفايات صناعة تحويل البطاطس لديها امكانيات كبيرة لإنتاج الإيثانول.

**كلمات البحث:** الإيثانول الحيوي، النفايات الغذائية، نشاء البطاطس، التخمر، خميرة الجعة، الطاقات المتجددة.

## Abstract

Waste from potato processing industry is an attractive source for upgrading industrial waste into renewable energy while eliminating this waste to help protect the environment in the context of sustainable development. The present study examines the production of bioethanol from potato starch derived from waste from the potato chip processing industry. The potato starch underwent acid hydrolysis with a 1M HCl solution and a ratio of material to acid solution of 1:2 (w / v) before being fermented by *Saccharomyces cerevisiae* yeast. The acid hydrolysis allowed releasing 159.3 g / l of reducing sugars to produce 54.3 g / l of ethanol after fermentation. Finally, the ethanol was recovered by distillation, allowing passing from 6.8 ° to 93.4 ° of alcohol. The results demonstrate that potato starch from waste from the potato processing industry has great potential for the production of ethanol.

**Key words:** Bioethanol, food-processing waste, potato starch, fermentation, *Saccharomyces cerevisiae*, renewable energies.

## Résumé

Les déchets issus de l'industrie de transformation de pomme de terre représentent une source intéressante permettant de valoriser les déchets industriels en une énergie renouvelable tout en éliminant ces déchets pour contribuer à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable. Le présent travail, étudie la production du bioéthanol à partir de l'amidon de pomme de terre issu des déchets de l'industrie de transformation de pomme de terre en chips. L'amidon de pomme de terre a subi une hydrolyse acide avec une solution de HCl à 1M et un rapport matière-acide 1:2 (p/v) avant d'être fermenté par la levure *Saccharomyces cerevisiae*. L'hydrolyse acide a permis de libérer 159,3 g/l de sucres réducteurs pour produire 54,3 g/l d'éthanol après fermentation. Finalement, l'éthanol a été récupéré par distillation permettant de passer de 6,8° à 93,4° d'alcool. Les résultats démontrent que l'amidon de pomme de terre, issu des déchets de l'industrie de transformation de pomme de terre, a un grand potentiel pour la production de l'éthanol.

**Mots clés :** Bioéthanol, déchets agroalimentaires, amidon de pomme de terre, fermentation, *Saccharomyces cerevisiae*, énergies renouvelables.

# Sommaire

INTRODUCTION.....	1
-------------------	---

## CHAPITRE 1 : PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

1. ÉNERGIES RENOUVELABLES .....	4
1.1. Généralités sur les énergies renouvelables .....	4
1.2. Développement des énergies renouvelables .....	4
1.2.1. Le cadre générale .....	4
1.2.2. Les énergies renouvelables en Algérie .....	5
1.3. Énergies renouvelables et déchets .....	9
2. GÉNÉRALITÉS SUR LA GESTION DES DÉCHETS EN ALGÉRIE .....	12
2.1. Les déchets ménagers et assimilés : .....	12
2.2. Les déchets industriels.....	13
3. PRODUCTION ET TRANSFORMATION DE POMME DE TERRE EN ALGÉRIE.....	15
3.1. Généralités sur la pomme de terre .....	15
3.2. La filière de pomme de terre en Algérie.....	15
3.3. Transformation de la pomme de terre.....	16
3.3.1. Les produits transformés destinés à l'alimentation humaine.....	16
3.3.2. Autres utilisations : alimentation animale et débouchés industriels .....	17
4. FERMENTATION ALCOOLIQUE ET PRODUCTION DE BIOÉTHANOL.....	19
4.1. L'amidon de pomme de terre.....	19
4.1.1. Généralités .....	19
4.1.2. Propriétés physico-chimiques de l'amidon de pomme de terre .....	19
4.2. L'éthanol.....	20
4.2.1. Généralités .....	20
4.2.2. Propriétés physiques .....	20
4.2.3. Propriétés chimiques .....	22
4.2.4. Utilisations .....	22
4.3. Production du bioéthanol.....	22
4.3.1. Bioéthanol à partir de sucre / amidon (première génération) .....	23
4.3.2. Bioéthanol à partir de ressources lignocellulosiques (deuxième génération).....	23
4.3.3. Bioéthanol à partir des algues (troisième génération).....	25
4.4. Fermentation alcoolique par <i>S. cerevisiae</i> .....	26

4.5.	Différents procédés de fermentation.....	27
4.5.1.	Le mode discontinu (ou batch) .....	27
4.5.2.	Le mode semi-continu (ou fedbatch) .....	28
4.5.3.	Le mode continu .....	28
4.6.	L'extraction de l'éthanol .....	29

## **CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODES**

5.	MATÉRIELS ET MÉTHODES .....	32
5.1.	L'amidon de pomme de terre.....	32
5.2.	Microorganismes et milieu de culture utilisés pour la fermentation .....	32
5.3.	Production du bioéthanol.....	32
5.3.1.	Hydrolyse acide de l'amidon de pomme de terre .....	33
5.3.2.	Fermentation de l'hydrolysate de l'amidon de pomme de terre .....	34
5.3.3.	Récupération de l'éthanol par distillation .....	34
5.4.	Les méthodes analytiques.....	35
5.4.1.	Détermination de la teneur en matière sèche et en eau .....	35
5.4.2.	Détermination du pH.....	36
5.4.3.	Détermination de la DO des microorganismes .....	36
5.4.4.	Détermination du taux de solides solubles (TSS ou °Brix) .....	36
5.4.5.	Détermination du taux des sucres réducteurs.....	36
5.4.6.	Analyse par HPLC (High-performance liquid chromatography) .....	37

## **CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION**

6.	RÉSULTATS ET DISCUSSION .....	39
6.1.	Caractéristiques de l'amidon de pomme de terre .....	39
6.1.1.	Aspect .....	39
6.1.2.	Détermination de la teneur pondérale en matière sèche et en eau .....	39
6.2.	Production du bioéthanol.....	40
6.2.1.	Hydrolyse acide de l'amidon de pomme de terre .....	40
6.2.2.	Caractéristiques physico-chimique de l'hydrolysate de l'amidon de pomme de terre .....	41
6.2.2.1.	Détermination du pH.....	41
6.2.2.2.	Détermination du taux de solides solubles (TSS ou °Brix).....	42
6.2.2.3.	Détermination du taux des sucres réducteurs .....	42
6.2.2.4.	Analyse par HPLC (High-performance liquid chromatography).....	42
6.2.3.	Fermentation alcoolique de l'hydrolysate de l'amidon de pomme de terre .....	42

6.2.3.1.	Évolution de la population microbienne durant la fermentation.....	42
6.2.3.2.	Évolution du pH durant la fermentation.....	44
6.2.3.3.	Évolution du taux de solides solubles (TSS ou °Brix).....	44
6.2.3.4.	Évolution de la teneur en sucre réducteur .....	45
6.2.3.5.	Évolution de la teneur en éthanol durant la fermentation .....	46
6.2.3.6.	Cinétique de la fermentation .....	47
6.2.3.7.	Évolution du degré d'éthanol après distillation.....	49
CONCLUSION GÉNÉRALE .....		52
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....		54
ANNEXES .....		60
Annexe 1 : Courbe d'étalonnage du glucose par DNS, méthode de Miller (1956).....		61
Annexe 2 : Courbe d'étalonnage du glucose (HPLC) .....		62
Annexe 3 : Courbe d'étalonnage de l'éthanol (HPLC) .....		63

## Liste des figures

Figure 1. Objectifs du programme algérien des énergies renouvelables.....	6
Figure 2. Programme algérien des énergies renouvelables Évolution des objectifs par filière .....	6
Figure 3. Classification des sources de la biomasse pour la production d'énergie .....	9
Figure 4. Énergies renouvelables et déchets (source, IEA).....	10
Figure 5. Modes de traitement des déchets en Algérie (AND, 2014) .....	12
Figure 6. Composition chimique du tubercule de pomme de terre .....	15
Figure 7. Structure chimique de (a) unité de glucose, (b) amylose, (c) amylopectine (adapté de Pérez et Bertoft, 2010) .....	19
Figure 8. Structure de la molécule d'éthanol (ACS).....	20
Figure 9. Production de bioéthanol à partir de la biomasse de première génération .....	23
Figure 10. Production de bioéthanol à partir de ressources lignocellulosiques .....	25
Figure 11. Les trois types du procédé de fermentation .....	28
Figure 12. Les étapes de la production du bioéthanol à partir de l'amidon de pomme de terre .....	33
Figure 13. Dispositif utilisé pour la de fermentation (Original) .....	34
Figure 14. Dispositif de distillation (Original).....	35
Figure 15. L'amidon de pomme de terre avant hydrolyse acide .....	39
Figure 16. Évolution de la teneur en glucose durant l'hydrolyse .....	40
Figure 17. Évolution de la population microbienne durant la fermentation .....	43
Figure 18. Évolution du pH durant la fermentation .....	44
Figure 19. Évolution du TSS (°Brix) durant la fermentation.....	45
Figure 20. Évolution de la teneur en sucre réducteur durant la fermentation .....	46
Figure 21. Évolution de la teneur en éthanol durant la fermentation.....	46
Figure 22. Cinétique de la fermentation.....	47
Figure 23. Degré d'éthanol au cours de la distillation .....	49

## Liste des tableaux

Tableau 1. Les capacités cumulées du programme EnR sur la période 2015 – 2030 (source, ministère de l'énergie).....	8
Tableau 2. Évolution de la production de pommes de terre de consommation 2008-2014 (MADRP, 2014).....	16
Tableau 3. Composition non glucidique et teneur en amylose de l'amidon de pomme de terre (DUPRAT et al., 1980) .....	20
Tableau 4. Propriétés physiques de l'éthanol (source : INRS) .....	21
Tableau 5. Paramètre physico-chimique de l'hydrolysate de pomme de terre .....	41

## Liste des abréviations

°C	: Degré Celsius
°GL	: Degrés Gay-Lussac
AND	: Agence Nationale des Déchets
CCNUCC	: Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques
CDER	: Centre de Développement des Énergies Renouvelables
CSP	: Centrale solaire thermique
DMA	: Déchets Ménagers et Assimilés
DNS	: L'acide 3,5-dinitrosalicylique
DO	: Densité Optique
EnR	: Énergies renouvelables
EtOH	: Éthanol
FAO	: Food and Agriculture Organization
GCMS	: Gas chromatography-mass spectrometry
GES	: Gaz à effet de serre
GW	: Gigawatt
HPLC	: High-performance liquid chromatography
IEA	: International Energy Agency (l'agence internationale de l'énergie)
INRS	: Institut national de recherche et de sécurité
ITCMI	: L'Institut des techniques des cultures maraîchères et Industrielles
MADRP	: Ministère de l'Agriculture, du Développement Rural et de la Pêche
MREE	: Ministère des ressources en eau et de l'environnement
MW	: Mégawatt
MYPA	: Malt, Yeast, Peptone, Agar
ONILEV	: Office National Interprofessionnel des Légumes et des Viandes

p/v : Poids/volume

PNAGDES : Programme National de Gestion des Déchets Industriels et Spéciaux

TEP : Tonnes Équivalent Pétrole

TSS : Taux de Solides Solubles

v/v : Volume/volume

# **INTRODUCTION**

---

## INTRODUCTION

La demande mondiale en énergie ne fait qu'augmenter mais elle est majoritairement dépendante des énergies fossiles qui présente de plus en plus des problèmes liés à la disponibilité des ressources en diminution continue vu leur nature non renouvelable en plus de leurs coûts d'extraction et d'exploitation. En plus, les énergies fossiles engendre des problèmes liés à l'environnement essentiellement l'émission de gaz à effet de serre (GES) notamment le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Ces gaz sont à l'origine du réchauffement de la planète qui est devenu une préoccupation mondiale poussant à trouver d'autres alternatives.

Les énergies renouvelables (éolien, solaire, hydraulique, biomasse) constituent un ensemble de solutions puisqu'elles permettent de réduire la dépendance vis-à-vis du pétrole et la pollution de notre environnement (**Isabelle Didden et al., 2008**).

Le bioéthanol représente une source d'énergie très prometteuse. Il peut être produit par des ressources naturelles renouvelables comme les végétaux contenant du saccharose (betterave, canne à sucre...) ou de l'amidon (blé, maïs, pomme de terre...). Cependant, des pays comme les États Unis ou le Brésil consacrent des cultures pour la production de l'éthanol ce qui est en compétition avec leurs utilisation pour l'alimentation humaines et animale. Cette tendance a été critiquée (**Rathmann, R et al., 2010**). La recherche scientifique attire une attention spéciale pour production du bioéthanol à partir d'autres ressources qui ne sont pas utilisée à des fins de consommation humaine ou animale.

Les déchets des issus de l'agriculture et des industries agroalimentaires offre cette opportunité. Ces derniers attirent l'attention sur la production d'éthanol en raison de leur abondance, de leur disponibilité, de leur biodégradabilité, de leur richesse en carbone et de leur contenu nutritif, et aussi pour gérer les problèmes de déchets de l'industrie sur le plan économique et environnemental (**Gassara, F, et al., 2010**).

La pomme de terre représente la première culture maraîchère en Algérie du point de vue superficie et production ce qui engendre de grandes quantités de déchets, également, riche en amidon et source importante de production du bioéthanol. Ces déchets proviennent de l'agriculture, de la consommation humaine et animale mais aussi de l'industrie de transformation de pomme de terre.

En effet, (**Charmley, E, et al., 2006**) explique que les déchets et sous-produits de l'industrie de la pomme de terre ont un potentiel pour l'industrie de la fermentation en raison de leur teneur élevée en amidon et de leur disponibilité. Dans l'industrie de la pomme de terre, 50% des pommes de terre

sont généralement gaspillées. Dans l'industrie des chips, d'autre part, 18% des déchets est de l'amidon (**Fadel, M, 2000**).

Le présent travail, se concentre sur la production du bioéthanol à partir de l'amidon de pomme de terre issu des déchets de l'industrie de transformation de pomme de terre en chips. L'objectif est de :

- Valoriser les déchets industriels en les transformant en produits de valeur ajoutée ;
- Contribuer au développement des énergies renouvelables en Algérie en s'inscrivant dans "*Le programme national de développement des énergies renouvelables*";
- Contribuer à la gestion des déchets, notamment industriels, s'inscrivant dans "*Stratégie nationale de la gestion des déchets*" ;
- Contribuer, finalement, à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.

Cette étude comporte trois parties :

- 1) **Partie bibliographique** : un aperçu sur les énergies renouvelables y compris la biomasse et la politique de l'Algérie pour son développement. La gestion des déchets industrielle a été exposée également. En fin, la littérature concernant la fermentation alcoolique et les différents procédés pour la production du bioéthanol a été mise en évidence.
- 2) **Matériels et méthodes** : le matériel utilisé pour la réalisation des différentes expériences et les méthodes analytiques ont été énumérés.
- 3) **Résultats et discussion** : les résultats obtenus ont été exposés et discutés afin d'en tirer des conclusions. Ces résultats ont été comparés par les différents travaux scientifiques réalisés auparavant.

Les résultats obtenus ont été satisfaisants et démontrent que l'amidon de pomme de terre, issu des déchets de l'industrie de transformation de pomme de terre peut être valorisé afin de produire de l'éthanol tout en participant à la gestion des déchets industriels.

# **CHAPITRE 1 : PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE**

---

## 1. ÉNERGIES RENOUVELABLES

### 1.1. Généralités sur les énergies renouvelables

L'énergie renouvelable (EnR) est une énergie obtenue à partir de ressources renouvelables, elle est définie comme une énergie exploitée par l'Homme, de telle manière que ses réserves ne s'épuisent pas. En d'autres termes, sa vitesse de formation doit être plus grande que sa vitesse d'utilisation. (Amory B. LOVINS, 1975).

Il existe plusieurs formes d'énergie renouvelables, dérivées directement ou indirectement du soleil ou de la chaleur produite au plus profond de la Terre, notamment l'énergie générée par le soleil, le vent, la biomasse et la biomasse solide, la chaleur terrestre, l'eau des fleuves, des lacs, des mers et des océans, le biogaz et les biocarburants liquides.

### 1.2. Développement des énergies renouvelables

#### 1.2.1. Le cadre générale

Depuis 1990, les sources d'énergie renouvelable dans le monde ont progressé à un rythme annuel moyen de 1,7 %, soit légèrement plus que le rythme de croissance de la production totale d'énergie primaire. Cette croissance a été particulièrement marquée pour les « nouvelles » énergies renouvelables (éolienne, solaire), lesquelles ont progressé en moyenne de 19 % par an.

Les énergies renouvelables se développent intensément partout dans le monde, portées par la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Selon l'agence internationale de l'énergie (IEA), 13,8 % d'énergie a été produite à partir de ressources renouvelables en 2014.<sup>1</sup>

En 2015, un nouveau record a été établi pour l'investissement dans le domaine des énergies renouvelables avec l'adhésion des pays en voie de développement. Tout cela s'est produit dans une année où les prix des combustibles fossiles ont chuté, causant de la détresse à de nombreuses entreprises impliquées dans le secteur des hydrocarbures. Jusqu'à présent, les moteurs de l'investissement dans les énergies renouvelables, y compris les politiques relatives aux changements climatiques et l'amélioration de la compétitivité des coûts, ont été plus que suffisants

---

<sup>1</sup> Renewables Information - 2016 edition - excerpt - Key Renewables Trends, disponible sur le site de l'IEA : [www.iea.org](http://www.iea.org)

pour permettre aux énergies renouvelables de continuer à accroître leur part de la production mondiale d'électricité au détriment des sources émettrices de carbone.<sup>2</sup>

Cette tendance a été maintenue en 2016 propulsée par la poursuite de prix bas des combustibles fossiles et la baisse considérables des prix de plusieurs technologies des énergies renouvelables.

Les capacités des énergies renouvelables sont installées, en majorité, dans les pays en voie de développement, notamment en Chine qui est le plus grand développeur d'énergie renouvelable au cours des huit dernières années. En 2016, les énergies renouvelables se propagent à un nombre croissant d'économies en développement et émergentes, dont certaines sont devenues des marchés importants.

La politique gouvernementale à tous les niveaux est restée importante pour le développement des énergies renouvelables. L'accord de Paris de 2015 concernant le Convention-cadre des Nations unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) est entré en vigueur à la 22<sup>ème</sup> Conférence des Parties (COP22) en novembre 2016. Toutefois, les marchés des énergies renouvelables ont été affectés uniquement indirectement au cours de l'année. Un certain nombre de gouvernements ont mis en place de nouveaux objectifs en matière d'énergies renouvelables et plusieurs villes ont établis de nouveaux engagements en faveur d'une énergie 100 % renouvelable.<sup>3</sup>

### 1.2.2. Les énergies renouvelables en Algérie

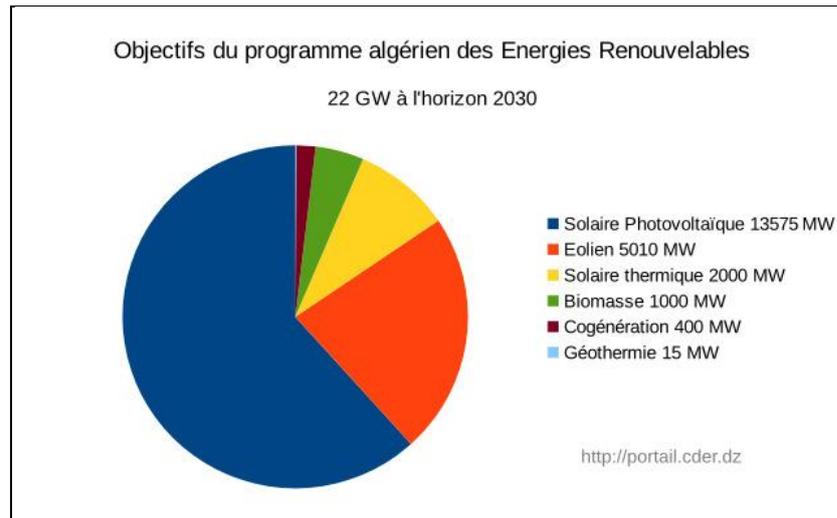
L'Algérie, à l'instar d'autres pays producteurs de pétrole et de gaz conventionnels commence à réaliser l'importance du développement des énergies renouvelables afin de limiter la dépendance de l'économie nationale et de protéger l'environnement. Un programme de développement des énergies renouvelables a été initié en 2014 afin de mettre en valeur les ressources renouvelables dont l'Algérie dispose en grande capacité et s'engageant, ainsi dans une nouvelle ère énergétique durable.

À la faveur de ce nouveau programme, les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique se placent au cœur des politiques énergétique et économique menées par l'Algérie. Ainsi d'ici 2030, 37 % de la capacité installée et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable. La répartition de ce programme par filière technologique est présentée dans la **Figure 1** suivante :

---

<sup>2</sup> Global Trends in Renewable Energy Investment 2016, <http://www.fs-unep-centre.org> (Frankfurt am Main)

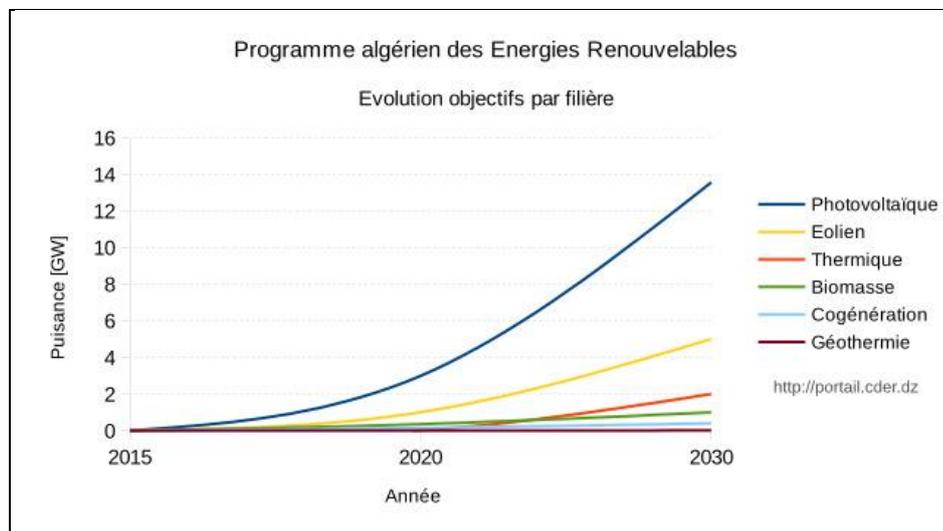
<sup>3</sup> REN21. 2017. Renewables 2017 Global Status Report.



**Figure 1. Objectifs du programme algérien des énergies renouvelables**

La réalisation du programme permettra d'atteindre à l'horizon 2030 une part de renouvelables de près de 27% dans le bilan national de production d'électricité et 37 % de la capacité installée. Le volume de gaz naturel épargné par les 22 000 MW en renouvelables, atteindra environ 300 milliards de m<sup>3</sup>, soit un volume équivalent à 8 fois la consommation nationale de l'année 2014.

Le programme de développement des énergies renouvelables se présente comme suit (**Figure 2**) :



**Figure 2. Programme algérien des énergies renouvelables**  
**Évolution des objectifs par filière**

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois.

Cela n'exclut pas pour autant le lancement de nombreux projets de réalisation de fermes éoliennes et la mise en œuvre de projets en biomasse, en géothermie et en cogénération.

### **1) Potentiel Solaire :**

Vue de sa localisation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  soit près de  $3\text{ KWh/m}^2$  au nord et dépasse  $5,6\text{ KWh/m}$  au Grand Sud (TAMENRASSET).

### **2) Potentiel Éolien :**

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes :

Le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est, avec des vitesses supérieures à  $7\text{ m/s}$  et qui dépassent la valeur de  $8\text{ m/s}$  dans la région de Tamanrasset (In Amguel).

Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tebessa, Biskra, M'sila et Elbayadh ( $6$  à  $7\text{ m/s}$ ), et le Grand Sud ( $>8\text{m/s}$ ).

### **3) Potentiel de l'Énergie Géothermique**

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysique a permis d'identifier plus de deux cent (200) sources chaudes qui ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays. Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à  $45^\circ\text{C}$ . Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre  $118^\circ\text{C}$  à Biskra.

Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les  $5^\circ\text{C}/100\text{ m}$

- Zone de Relizane et Mascara ;
- Zone de Aïne Boucif et Sidi Aïssa ;
- Zone de Guelma et Djebel El Onk.

#### 4) Potentiel Hydraulique :

Les quantités globales tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m<sup>3</sup>, mais finalement profitent peu au pays : nombre réduit de jours de précipitation, concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer.

Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m<sup>3</sup>, dont environ 2/3 pour les ressources en surface.

103 sites de barrages ont été recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation.

#### 5) Potentiel de la Biomasse :

##### A) Potentiel des forêts

En Algérie, la direction des forêts a estimé **37 Millions de TEP** (Tonnes Équivalent Pétrole). Le potentiel récupérable est de l'ordre **3,7 Millions de TEP**. Le taux de récupération actuel est de l'ordre de **10%**.<sup>4</sup>

##### B) Potentiel énergétique des déchets urbains et agricoles

05 millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1.33 millions de TEP/an.<sup>5</sup>

Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** donne les capacités cumulées du programme EnR, par type et phase, sur la période 2015 - 2030 :

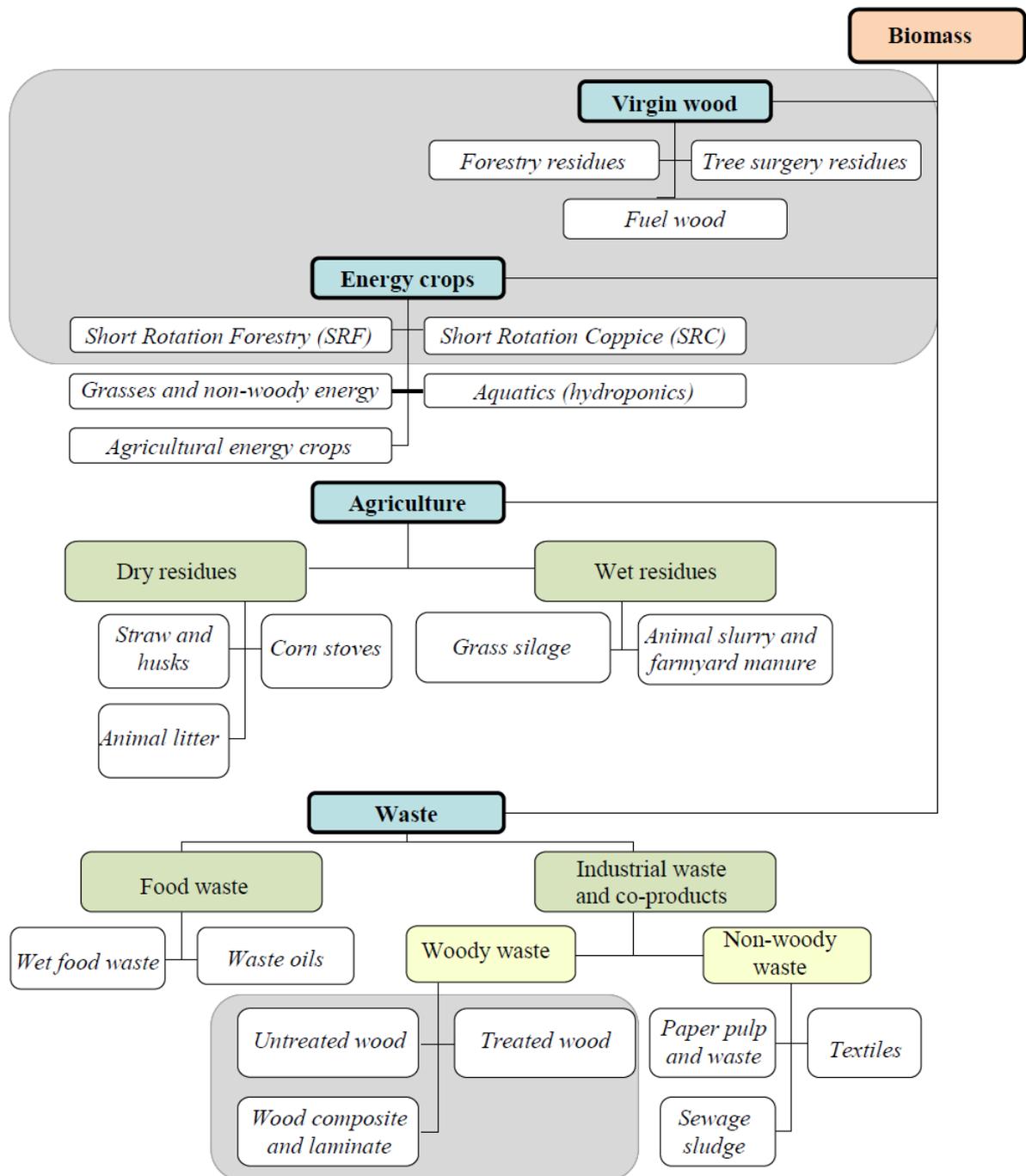
**Tableau 1. Les capacités cumulées du programme EnR sur la période 2015 – 2030 (source, ministère de l'énergie)**

	1ère phase 2015 -2020	2ème phase 2021- 2030	TOTAL
Photovoltaïque	3 000	10 575	13 575
Eolien	1 010	4 000	5 010
CSP	-	2 000	2 000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1 000
Géothermie	05	10	15
<b>TOTAL</b>	<b>4 525</b>	<b>17 475</b>	<b>22000</b>

<sup>4</sup> Bilan 2010, Direction Générale des Forêts.

<sup>5</sup> Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans les zones nord, semi-aride et aride d'Algérie 2014, Agence Nationale des Déchets.

## 1.3. Énergies renouvelables et déchets



Note: Biomasses from woody materials are in the shaded areas.

**Figure 3. Classification des sources de la biomasse pour la production d'énergie**

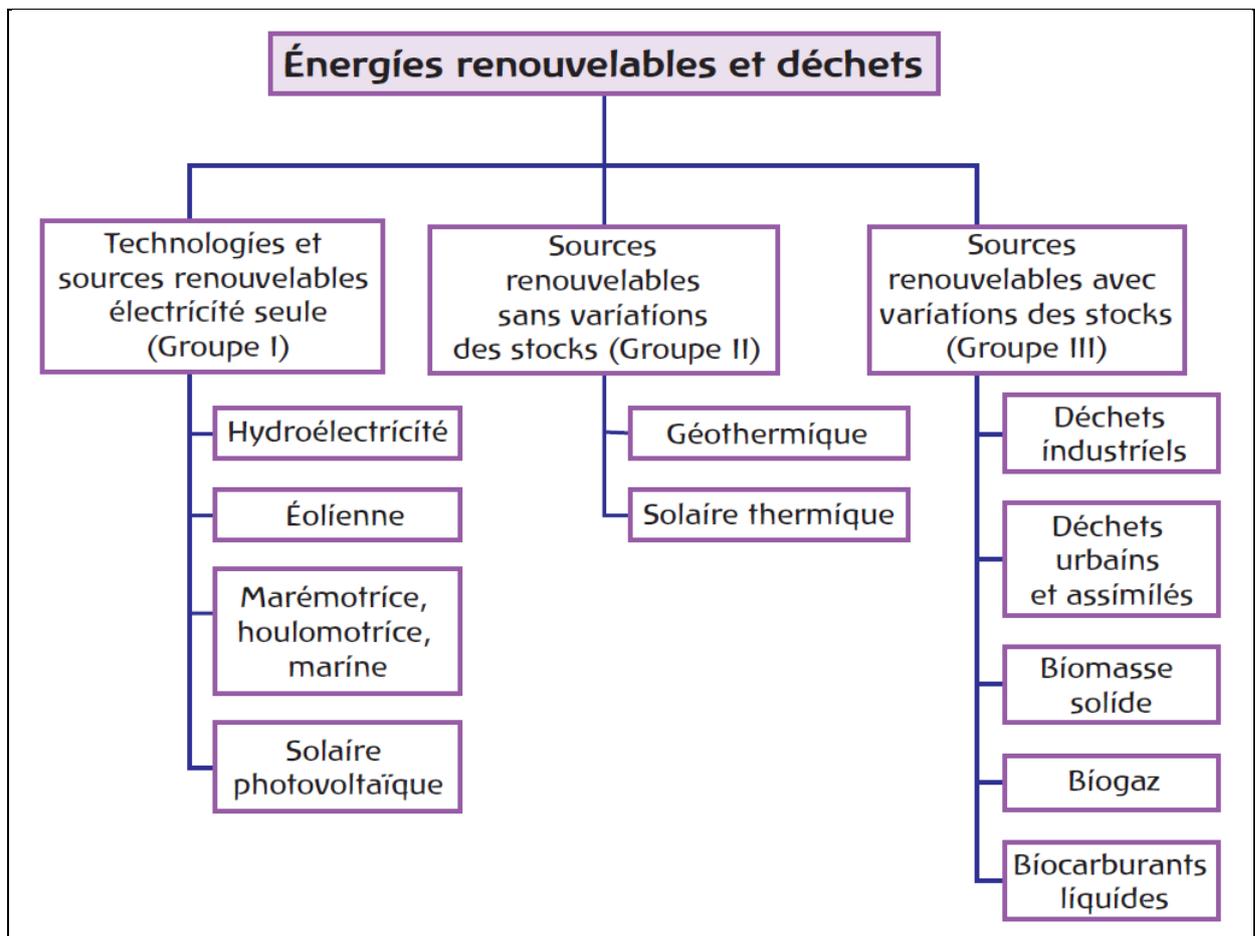
(Svetlana Ladanai et al, 2009)

Les déchets sont un combustible composé de matériaux divers issus des déchets de l'industrie, des administrations, des hôpitaux et des ménages, comme le caoutchouc, le plastique, les déchets de combustibles fossiles et d'autres produits semblables. Ils sont soit solides soit liquides, renouvelables ou non renouvelables, biodégradables ou non biodégradables.

La biomasse solide (essentiellement le bois de chauffage utilisé pour cuisiner dans les pays en développement) est de loin la principale source d'énergie renouvelable. Elle représente plus de 10% de la production totale d'énergie primaire de la planète et les trois quarts de l'offre mondiale d'énergies renouvelables.

L'ensemble de la biomasse peut être considérée comme source de bioénergie, ce qui permet autant d'applications énergétiques (**Figure 3**).

L'IEA classe les énergies renouvelables et déchets en trois grands groupes (**Figure 4**) :



**Figure 4. Énergies renouvelables et déchets (source, IEA)**

- **le groupe I** comprend les produits qui doivent être transformés en électricité pour pouvoir être utilisés (tels que l'énergie hydraulique ou photovoltaïque solaire) ;

- **le groupe II** comprend les produits qui sont fabriqués et consommés pour de multiples usages dans les secteurs de la transformation et de la consommation (tels que l'énergie géothermique ou solaire thermique). De par leur nature, ces produits ne peuvent pas être stockés au sens conventionnel du terme et, par conséquent, ils ne font l'objet d'aucunes statistiques sur les variations des stocks ;
- **le groupe III** comprend les produits qui sont fabriqués et utilisés pour de multiples usages dans les secteurs de la transformation et de la consommation finale (les déchets, le bois de chauffage, le biogaz et les biocarburants liquides). La nature de ces produits permet de les stocker au sens conventionnel du terme. Ils peuvent donc faire l'objet de statistiques sur les variations des stocks

Le chapitre suivant donne un aperçu sur la gestion des déchets en Algérie, notamment les déchets ménagers et assimilés et les déchets industriels.

## 2. GÉNÉRALITÉS SUR LA GESTION DES DÉCHETS EN ALGÉRIE

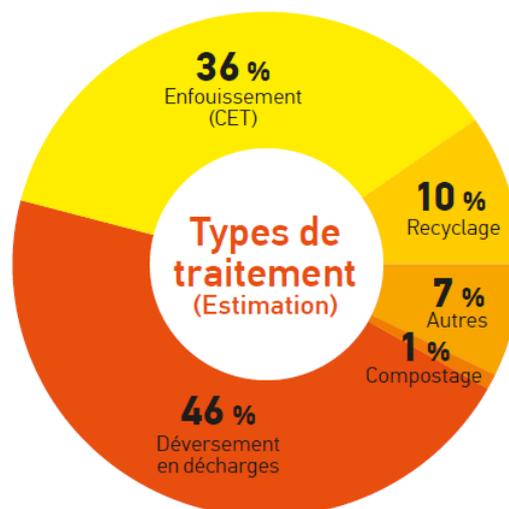
### 2.1. Les déchets ménagers et assimilés :

En Algérie, à l'instar des autres pays du monde, la production des déchets ne fait qu'augmenter. La croissance démographique, l'urbanisation de plus en plus forte et les transformations socio-économiques que connaît le pays ces dernières années ont été accompagnées par des changements notables au niveau des quantités et de la qualité des déchets produits.

La loi 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets définit le cadre général du contrôle et de l'élimination des déchets et consacre les principes d'une gestion rationnelle et saine des déchets et l'ensemble des activités qui s'y rapportent notamment la collecte, le transport, le tri, la valorisation et le traitement.

La production globale des déchets industriels (y compris les déchets industriels banals) est évaluée à 2 547 000 tonnes/an avec une quantité en stock de 4 483 500 tonnes. Les déchets spéciaux générés sont de l'ordre de 325 100 T/an. Les quantités de déchets stockés en attente d'une solution d'élimination sont de l'ordre de 2 008 500 tonnes.<sup>6</sup>

Parmi les déchets solides générés en Algérie, les déchets ménagers et assimilés (DMA) représentent la fraction la plus importante avec environ 11 millions de tonnes/an (2014). La maîtrise de leur composition est donc nécessaire pour évaluer au préalable leur potentiel risque pour le milieu récepteur et le choix du mode de traitement le plus optimal.<sup>7</sup>



**Figure 5. Modes de traitement des déchets en Algérie (AND, 2014)**

<sup>6</sup> Collection sur les statistiques de l'environnement, ONS, 2012 (disponible sur le site de l'ONS : [www.ons.dz](http://www.ons.dz))

<sup>7</sup> Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans les zones nord, semi-aride et aride d'Algérie 2014, Agence nationale des déchets (disponible sur le site de l'AND : <https://and.dz>)

A ce jour, la mise en décharge est la destination finale la plus privilégiée pour l'élimination des déchets ménagers et assimilés du fait, de son faible coût par rapport aux autres filières comme l'incinération ou le compostage (**Figure 5**).

Cet état de fait a provoqué la saturation des décharges existantes et a engendré des problèmes d'hygiène et de salubrité publique (odeurs nauséabondes, problèmes respiratoires, allergie...). Ajouter à cela, le potentiel risque que constituent les lixiviats pour les nappes phréatiques ainsi que les émissions des gaz à effet de serre.

Selon les services du Ministère des ressources en eau et de l'environnement (MREE), pour la seule année 2000, les décharges ont émis environ 7 542 000 Teq.CO<sub>2</sub>.

### **2.2. Les déchets industriels**

L'activité industrielle en Algérie est diversifiée. Les activités les plus importantes, du fait de leur taille et de leur impact sur l'environnement sont l'agroalimentaire, l'industrie du textile, le tannage du cuir, l'industrie automobile, l'industrie métallurgique, imprimerie, l'industrie chimique, traitement de surface, cimenterie. L'activité industrielle se déroule principalement autour des grandes agglomérations urbaines et le long des côtes.

Les principaux problèmes environnementaux générés par les entreprises sont :

- Utilisation excessive d'eau et d'énergie dans les process
- Perte importante de matière première dans la production
- Importante quantité d'eaux usées générées et non traitées
- Rejets atmosphériques souvent non contrôlés
- Mauvaise gestion des déchets

Les déchets agroalimentaires sont de plus en plus croissants, polluants et coûteux à gérer, les principales formes de pollution sont les suivantes :

- Pollution hydrique due aux eaux de procédés, eau de nettoyage, etc. Ces rejets sont, de leur origine, riches en matières organiques et renferment des acides aminés, des sucres et des hydrates de carbone, des graisses animales et végétales, des acides organiques, des alcools et des aldéhydes et cétones, sous forme originelle ou modifiée suite à la fermentation, etc.
- Déchets solides.

Selon l'AND, les quantités des déchets industriels sont estimées à 2,5 millions de tonnes par an, alors que le taux de récupération ne dépasse pas les 7%.

Pour faire face à cette situation, le gouvernement algérien a adopté, depuis l'année 2001, la loi 01-19 du 12 (décembre 2001), relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets. La valorisation des déchets industriels par leur réemploi et leur recyclage constituent une préoccupation majeure des autorités algériennes. Cela s'est traduit par le lancement et la mise en œuvre de plusieurs projets dont notamment le Programme National de Gestion des Déchets Industriels et Spéciaux (PNAGDES) lancé en 2006, mis en place pour trouver des solutions pour le traitement de ce type de déchets par :

- La promotion des métiers et services liés à la gestion des déchets spéciaux ;
- La mise en place des filières de collecte, de transport, de regroupement, de traitement et de valorisation des déchets spéciaux.

Selon l'Agence Nationale des Déchets (AND), il existe 873 micro-entreprises spécialisées dans la récupération et la valorisation des déchets, dont seulement 247 entreprises sont opérationnelles. Cela montre clairement que le secteur de la valorisation des déchets reste vierge en Algérie. Sur un autre plan, la réduction des ressources financières extérieures de l'Algérie nous incite à rechercher de nouvelles voies et de nouveaux moyens pour contribuer à la substitution de la production locale aux importations, pour exploiter au maximum les ressources productives disponibles en Algérie notamment par la récupération et le recyclage des déchets et pour encourager l'investissement dans les nouvelles activités et la création de nouvelles entreprises

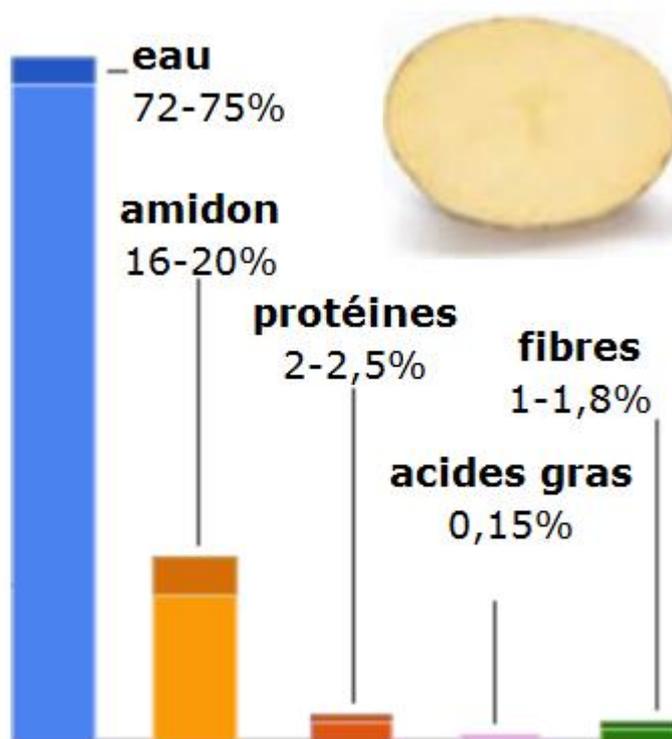
L'une des industries agroalimentaire génératrice des déchets est l'industrie de transformation de pomme de terre. Un aperçu sur la capacité de production de pomme de terre en Algérie et l'industrie de transformation liée est présenté dans le chapitre suivant.

### 3. PRODUCTION ET TRANSFORMATION DE POMME DE TERRE EN ALGÉRIE

#### 3.1. Généralités sur la pomme de terre

La pomme de terre (*Solanum tuberosum L.*) est une plante vivace herbacée qui peut atteindre 1 mètre et produit un tubercule, la pomme de terre elle-même, qui, en raison de sa richesse en amidon, figure au quatrième rang des principales cultures vivrières, après le maïs, le blé et le riz.

La composition chimique du tubercule de pomme de terre est présentée dans la **Figure 6** suivante :



**Figure 6. Composition chimique du tubercule de pomme de terre**

Une fois récoltée, la pomme de terre peut être utilisée de diverses manières, et pas seulement comme légume. En fait, moins de la moitié des tubercules produits dans le monde sont consommés frais. Le reste est transformé en produits dérivés et en ingrédients alimentaires pour nourrir les vaches, les porcs et les poulets, en fécule destinée à l'industrie ou bien réutilisé sous forme de plants pour la prochaine saison agricole.

#### 3.2. La filière de pomme de terre en Algérie

Selon les historiens, l'entrée de la pomme de terre en Algérie remonte au milieu de la première décennie du dix-neuvième siècle, elle a été cultivée principalement pour l'exporter vers le marché Français. Après l'indépendance, elle est devenue un produit important pour la consommation locale, et elle est devenue de plus en plus importante dans le régime alimentaire. La demande en cette

culture s'est alors accrue. Elle représente la première culture maraîchère du point de vue superficie et production, avec une superficie plantée de **156 176 ha** et une production de **46 735 155 quintaux** avec un taux de rendement de **299,2 qx/ha**, selon le Ministère de l'Agriculture (ONILEV).

L'offre nationale de cette culture et d'autres cultures maraichères n'a cessé d'augmenter constamment suite à la prise de conscience dans les années quatre-vingt. Après la détérioration du secteur agricole à la suite de l'indépendance où le secteur agricole assurait de hautes performances et jouissait d'une réputation d'un secteur majoritairement exportateur, un programme national d'intensification des productions considérées comme stratégiques a été décidé par le Ministère de l'agriculture, il s'agissait d'opérer par des politiques de soutien de toutes sortes et avec un mode d'organisation technique très avancé. Il concernait les céréales, les légumes secs et la pomme de terre. L'Institut des techniques des cultures maraîchères et Industrielles (ITCMI) était chargé de la mise en œuvre du programme relatif aux cultures maraîchères, et particulièrement celui de la pomme de terre.

La culture de la pomme de terre en Algérie a connu un développement spectaculaire. Cet accroissement des superficies cultivées en pomme de terre était accompagné d'une importante augmentation des rendements :

**Tableau 2. Évolution de la production de pommes de terre de consommation 2008-2014 (MADRP, 2014)**

<b>Année</b>	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
<b>Production de P. de terre de consommation (Qx)</b>	19 707 280	24 408 380	30 825 205	36 400 694	39 126 314	45 506 341	43 548 761

### **3.3. Transformation de la pomme de terre**

#### **3.3.1. Les produits transformés destinés à l'alimentation humaine**

Selon le type de préparation, on peut classer les produits transformés en trois grandes catégories :

- les produits cuits appertisés, stérilisés en bocaux, en boîtes ou en sachets de plastiques;
- les produits déshydratés (poudres et flocons) destinés à la confection de purées reconstituées ou utilisés pour la fabrication de potages, snacks, etc. ;
- les produits frits: chips, frites fraîches ou surgelées, pommes pailles ...

D'après les chiffres de la FAO, plus des deux tiers des 320 millions de tonnes de pommes de terre produites en 2005 ont été réservés à un usage alimentaire. Mais la consommation mondiale a changé: les tubercules sont de plus en plus consommés, non plus frais mais sous forme de produits transformés, à valeur ajoutée.

Parmi les produits transformés, les *chips* sont l'un des snacks les plus prisés dans les pays développés. Ces fines lamelles de pommes de terre frites dans l'huile ou cuites au four sont parfois fabriquées à partir de flocons de pommes de terre déshydratés.

Les *flocons de pommes de terre déshydratés* et les *granules* sont obtenus par séchage de pommes de terre réduites en purée jusqu'à obtention d'un taux d'humidité de 5 à 8 pour cent. On obtient un autre produit déshydraté, la *farine de pomme de terre*, par broyage de tubercules entiers qui sont précuits et conservent le goût de la pomme de terre. Les techniques modernes permettent d'extraire jusqu'à 96 pour cent de la féculé contenue dans la pomme de terre.

### **3.3.2. Autres utilisations : alimentation animale et débouchés industriels**

Si la pomme de terre est un produit bien connu du grand public pour son utilisation alimentaire, en revanche, lorsqu'on s'intéresse aux usages non alimentaires de ce tubercule, on entre dans un monde beaucoup plus confidentiel.

#### **3.3.2.1. L'alimentation animale**

Les tubercules de pommes de terre peuvent être distribués aux animaux dans certaines conditions et constituent, comme pour les humains, un aliment de bonne qualité nutritionnelle. Ici, il faut distinguer deux types de consommation possibles de la pomme de terre pour les animaux. Sous forme de tubercules crus, entiers ou coupés, ce type d'aliment convient bien aux ruminants et aux chevaux capables de digérer aussi facilement les tubercules crus que cuits tandis que les porcs et les volailles exigent des pommes de terre fraîchement étuvées et ensilées.

En Europe, autrefois les pommes de terre servaient surtout à nourrir les animaux de la ferme. Dans la Fédération de Russie et certains pays d'Europe de l'Est, la moitié de la récolte est encore réservée à cet usage.

#### **3.3.2.2. La féculé de pomme de terre**

Les principales sources d'amidon en Europe sont le maïs (57 % de la production), le blé (23 %) et la pomme de terre (20 %). Il faut 5 tonnes de pommes de terre (0,14 ha) ou 1,6 tonne de maïs (0,23 ha) ou 1,8 tonne de blé (0,33 ha) pour produire une tonne d'amidon.

La féculé est chimiquement un amidon mais, selon l'usage, le terme d'«amidon» est réservé aux céréales. Le terme «féculé) s'applique lorsque l'organe de réserve de la plante est une racine ou un tubercule.

La féculé de pomme de terre est utilisée par les industries pharmaceutiques, textile, du bois et les papeteries comme adhésif, liant, apprêt et mastic, ainsi que par les compagnies qui perforent les puits pétroliers pour laver les puits. C'est un substitut 100 pour cent biodégradable des polystyrènes et autres matières plastiques servant par exemple à fabriquer les assiettes et les couverts jetables.

### **3.3.2.3. L'éthanol biocarburant**

Le bioéthanol est un alcool très pur obtenu par la fermentation de matières agricoles riches en sucres provenant de plantes saccharifères (betterave, canne à sucre), amylacées (céréales, pomme de terre) ou ligno-cellulosiques. Il peut être employé de deux façons, en addition à l'essence sous la forme d'un alcool anhydre qui ne modifie pas les performances des moteurs ou comme carburant unique dans des moteurs adaptés, en général à injection.

La fermentation alcoolique s'effectue à partir de sucres simples. Pour les plantes amylacées il faut donc au préalable transformer l'amidon en glucose.

Il est encore difficilement envisageable de rémunérer un producteur qui ne livrerait sa production de pommes de terre que pour une production d'éthanol. Par contre, l'utilisation des écarts de triage et des déchets de l'industrie de transformation de pommes de terre, permettrait dès à présent de valoriser ces surplus.

D'après une étude réalisée dans la province canadienne du Nouveau-Brunswick, productrice de pommes de terre, avec 44 000 tonnes de déchets issus de l'industrie de transformation, on pourrait produire 4 à 5 millions de litres d'éthanol.

En ce qui concerne les cultures énergétiques, matières premières des biocarburants, pour l'Algérie, il n'est pas possible d'avoir recours à des cultures destinées à l'alimentation humaine ou encore animale, pour la production de carburants propres. Il serait alors plus judicieux de se retourner vers les biocarburants de deuxième génération produits à partir de cellulose et de déchets (**Jean-Michel B., 2004**).

## 4. FERMENTATION ALCOOLIQUE ET PRODUCTION DE BIOÉTHANOL

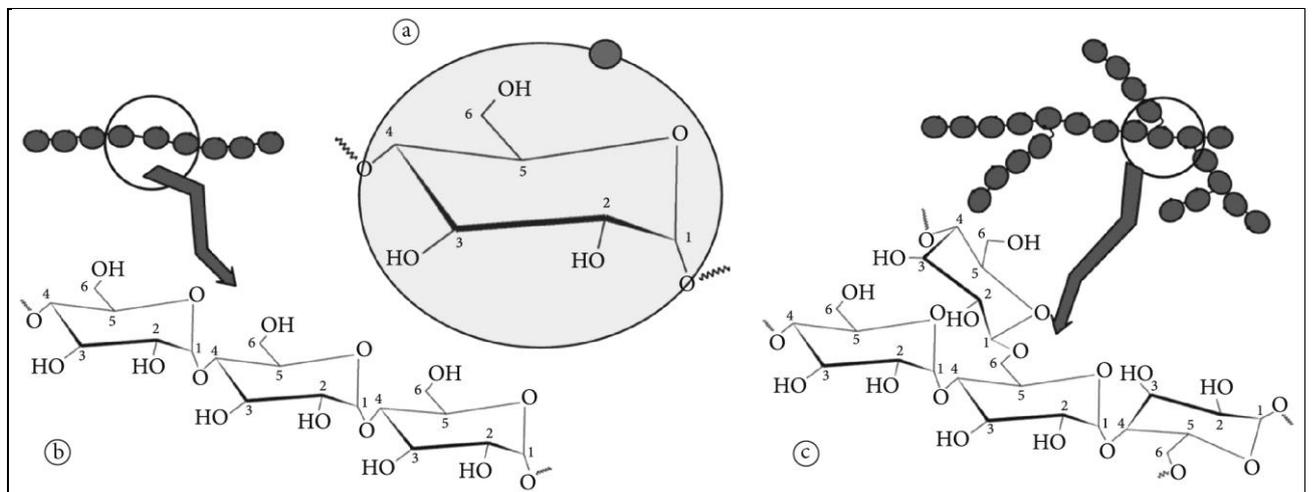
### 4.1. L'amidon de pomme de terre

#### 4.1.1. Généralités

L'amidon est constitué majoritairement d'une fraction glucidique (98 à 99%) et d'une fraction non glucidique mineure (1 à 2%). Cette dernière, malgré sa présence en faible quantité, ne doit pas être négligée, car elle modifie les propriétés fonctionnelles, en particulier la présence des lipides. L'amidon est un homopolymère d'unité D-glucose, dans la conformation chaise la plus stable. Les unités D-glucoses sont liées majoritairement (95 à 96 %) par des liaisons de type  $\alpha$  (1,4) et dans une moindre mesure (4 à 5 %) par des liaisons de type  $\alpha$  1,6.

L'amidon est composé de deux polymères de structure primaire différente: l'amylose, molécule essentiellement linéaire et l'amylopectine, molécule ramifiée.

Selon l'origine botanique, les teneurs en amylose et en amylopectine varient respectivement de 20 à 30% et de 70 à 80% pour les amidons standards. Cependant, quelques espèces d'amidon peuvent contenir moins de 1% d'amylose (maïs cireux ou waxy) ou entre 45 à 80% d'amylose (amylomais). (S. A. Bahrani, 2012).



**Figure 7. Structure chimique de (a) unité de glucose, (b) amylose, (c) amylopectine (adapté de Pérez et Bertoft, 2010)**

#### 4.1.2. Propriétés physico-chimiques de l'amidon de pomme de terre

Le tubercule de pomme de terre contient 65 à 85 % d'amidon (% en matière sèche) (DUPRAT et al., 1980). L'eau, les protéines, les lipides et les sels minéraux sont les autres composants des tubercules de pomme de terre.

D'après (DUPRAT et al., 1980), la fraction non glucidique du grain d'amidon représente 0,5 à 2 % de leur composition chimique totale (voir Erreur ! Source du renvoi introuvable.):

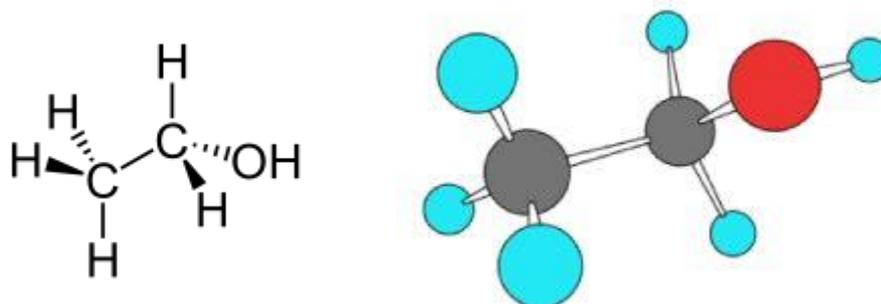
**Tableau 3. Composition non glucidique et teneur en amylose de l'amidon de pomme de terre (DUPRAT et al., 1980)**

Composition	Protéines	Lipides	Cendres	Phosphore	Amylose
(% d'amidon sec de pomme de terre)	0,05	0,09	0,3	0,04	23

## 4.2. L'éthanol

### 4.2.1. Généralités

L'éthanol (EtOH), ou encore alcool éthylique, molécule de formule développée  $C_2H_5OH$  comporte deux atomes de carbone liés (C), l'un portant trois atomes d'hydrogène (H), l'autre deux atomes d'hydrogène et une fonction hydroxyle (OH).<sup>8</sup>



**Figure 8. Structure de la molécule d'éthanol (ACS)<sup>9</sup>**

### 4.2.2. Propriétés physiques

L'éthanol est un liquide mobile, incolore, volatil, d'odeur plutôt agréable, décelable dès 84 ppm.

L'éthanol est miscible à l'eau, le mélange se faisant avec dégagement de chaleur et contraction du liquide (INRS, **Éthanol, Fiche toxicologique n°48**).

Par contre il y a expansion du liquide lorsque l'éthanol est mélangé à de l'essence.

L'éthanol est également miscible à la plupart des solvants usuels. C'est un bon solvant des graisses.

<sup>8</sup> Société Chimique de France (SCF) : <http://www.societechimiquedefrance.fr/ethanol>

<sup>9</sup> American Chemical Society (ACS) : <https://www.acs.org/content/acs/en/molecule-of-the-week>

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 % en volume (**INRS, Éthanol, Fiche toxicologique n°48**).

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 %.

Pour les usages autres qu'alimentaires, des dénaturants sont ajoutés. L'éthanol dénaturé, que l'on trouve également dans le commerce sous le nom d'**alcool à brûler**, est de l'éthanol dans lequel on a dissous divers produits pour le rendre impropre à la consommation.

**Tableau 4. Propriétés physiques de l'éthanol (source : INRS)**

NOM SUBSTANCE	DÉTAILS	
Éthanol	N° CAS	64-17-5
	Etat Physique	Liquide
	Masse molaire	46,07
	Point de fusion	-114°C
	Point d'ébullition	78 à 78,5 °C
	Densité	0,789
	Densité gaz / vapeur	1,59
	Pression de vapeur	5,9 kPa à 20 °C 10 kPa à 30 °C 29,3 kPa à 50 °C
	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.) (coupelle fermée)
	Température d'auto-inflammation	423 - 425 °C ; 363 °C (selon les sources)
	Limites d'explosivité ou d'inflammabilité (en volume % dans l'air)	limite inférieure : 3,3 % limite supérieure : 19 %
	Coefficient de partage n-octanol / eau (log Pow)	- 0,31

### 4.2.3. 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...

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 éthylates, la plupart des autres métaux usuels étant insensibles à l'éthanol.

### 4.2.4. Utilisations

- Solvant utilisé dans l'industrie des peintures, vernis, encres, matières plastiques, adhésifs, explosifs, parfums, cosmétiques, l'industrie pharmaceutique...
- Matière première pour la production de nombreux composés : acide acétique, acrylate d'éthyle, acétate d'éthyle, éthers de glycol, éthylamine, éthylène, éthers-oxydes notamment l'ETBE (éthyl-tert-butyl-éther)...
- Constituant de carburants : le « bioéthanol », éthanol obtenu à partir de matières premières végétales, peut être utilisé seul ou avec de l'essence ; les mélanges essence-éthanol renferment 5 à 95 % de bioéthanol selon les pays. En France, la réglementation fixe à 5,75 % le taux d'incorporation de bioéthanol dans l'essence en 2008 pour atteindre 10 % en 2010 ; toutefois la commercialisation d'un carburant renfermant 85 % de bioéthanol et 15 % d'essence sans plomb autorisée fin 2007, se généralise dans les stations service (E85).
- Désinfectant, biocide.
- Composant de boissons alcoolisées.

## 4.3. Production du bioéthanol

Le bioéthanol peut être produit à partir:

- De substrats riches en sucrose (canne à sucre, betterave sucrière, etc.), en amidon (maïs, orge, blé, pomme de terre, etc.),
- De substrats celluloseux tels que les résidus agricoles (la paille ou les cannes de maïs), les résidus forestiers, cultures énergétiques (le panic érigé ou des arbres à courte rotation),

– Des algues.

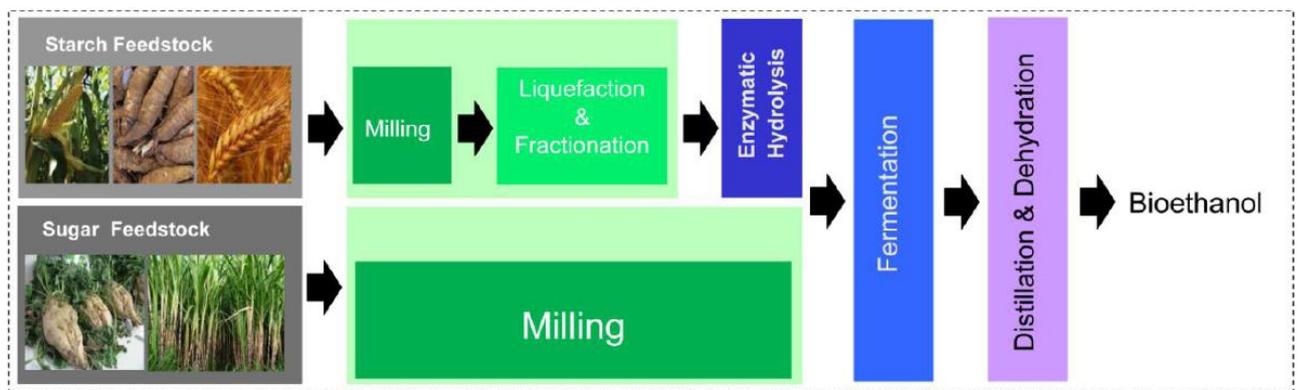
#### 4.3.1. Bioéthanol à partir de sucre / amidon (première génération)

*Le bioéthanol de première génération* est produit à partir de maïs et de canne à sucre en utilisant une technologie bien établie (Sims, R. et al., 2008). Les étapes de la production d'éthanol provenant des cultures riches en sucre et amidon sont présentées dans la **Figure 9**.

Les récoltes de sucre comme la canne à sucre, la betterave à sucre et le sorgho doux se composent principalement du glucose, du fructose et du saccharose comme composants principaux (Bai, F. et al., 2008). Ces sucres fermentescibles sont extraits par broyage ou concassage puis fermentation en éthanol. En outre, l'éthanol est séparé du flux de produits par distillation puis déshydratation.

La rentabilité de la production d'éthanol à partir de matières premières alimentaires et les impacts sur les changements dans l'utilisation des terres a été critiquée (Rathmann, R et al., 2010).

De tels inconvénients du bioéthanol de première génération ont donné lieu à la nécessité d'une production d'éthanol à partir de matières premières non alimentaires telles que la biomasse (Devarapalli M., Atiyeh H.K, 2015).



**Figure 9. Production de bioéthanol à partir de la biomasse de première génération**

(Adapté de Sim et al., 2008)

#### 4.3.2. Bioéthanol à partir de ressources lignocellulosiques (deuxième génération)

Les matières premières non alimentaires utilisées pour la production d'éthanol de deuxième génération comprennent la biomasse cellulosique, telles que les cultures énergétiques dédiées (p. Ex., Les arachides, les miscanthus) et les résidus agricoles et de bois (p. Ex., Copeaux de bois, bagasse à la canne à sucre et sciure de bois). La biomasse cellulosique est principalement constituée de polymères de cellulose, d'hémicellulose et de lignine liés entre eux dans une matrice hétérogène.

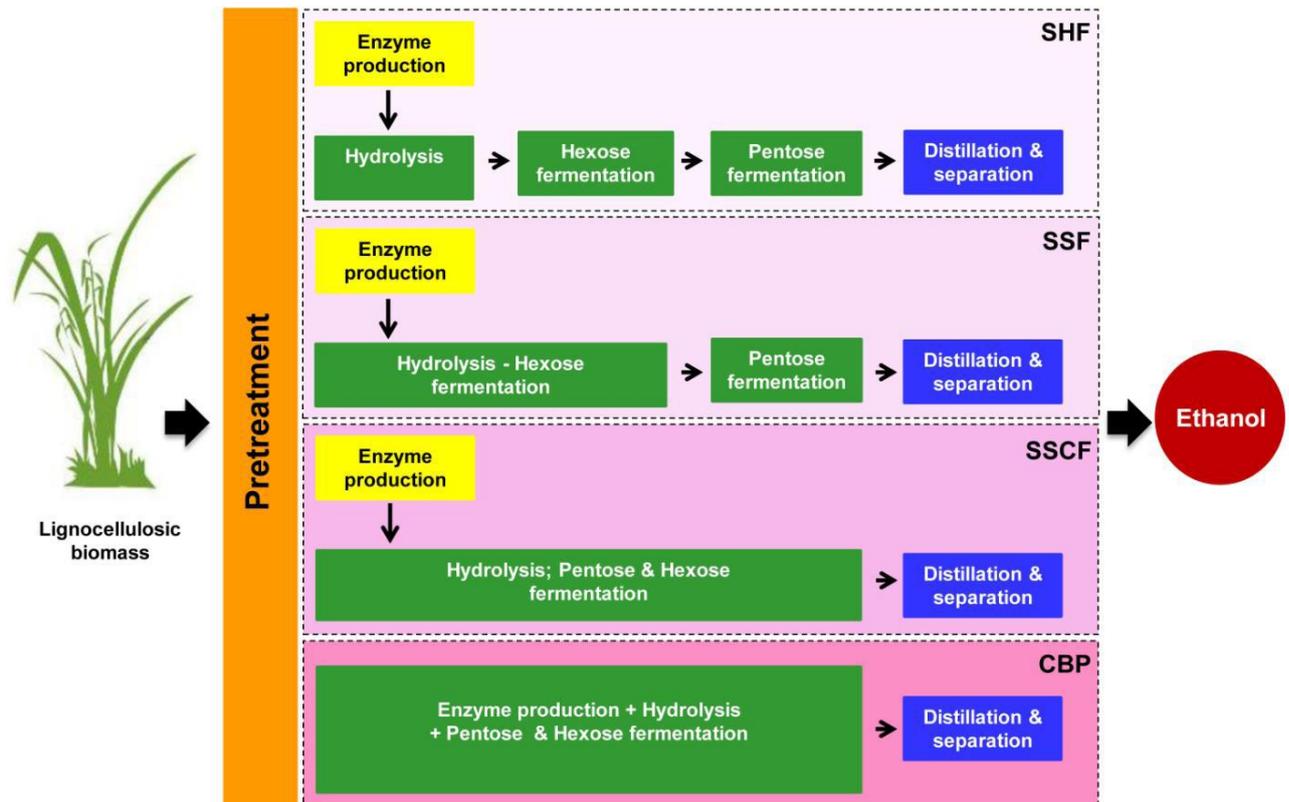
La cellulose est un polysaccharide linéaire constitué de plusieurs unités de D-glucose liées à la  $\beta$  (1-4). L'hémicellulose est un hétéropolymère de xylose, de mannose, de galactose, de rhamnose et d'arabinose. La lignine est un polymère complexe de composés aromatiques réticulés. La lignine agit comme une barrière protectrice et empêche la dépolymérisation de la cellulose et de l'hémicellulose en sucres fermentescibles. Contrairement à la production d'éthanol de première génération, le processus de conversion des matières premières cellulosiques en éthanol est complexe. La biomasse cellulosique est d'abord prétraitée chimiquement ou enzymatiquement pour décomposer les unités polymères et augmenter l'accessibilité des sucres C5-C6 pour la fermentation microbienne pour produire de l'éthanol.

Les étapes de la production d'éthanol provenant des ressources lignocellulosiques sont présentées dans la **Figure 10**.

Le bioéthanol de deuxième génération à partir de matières premières cellulosiques a été démontré avec succès dans une usine à échelle pilote (**Menetrez, 2014**). Récemment en 2014, on a commandé des centrales à l'éthanol cellulosique à l'échelle commerciale de 25 millions de gallons par an par POET-DSM et Abengoa Bioenergy (Lane, 2015; POET-DSM, 2014). De plus, l'usine d'éthanol cellulosique de 30 millions de gallons par an de DuPont a commencé sa production en 2015<sup>10</sup>.

---

<sup>10</sup> <http://www.dupont.com/products-and-services/industrial-biotechnology/press-releases/DuPont-Wins-Bulldog-Award-for-Opening-of-Cellulosic-Ethanol-Biorefinery.html>



(i) Separate Hydrolysis & Fermentation (SHF) ; (ii) Simultaneous Saccharification & Fermentation (SSF) ; (iii) Simultaneous Saccharification & Co-Fermentation (SSCF) ; (iv) Consolidated Bioprocessing (CBP)

**Figure 10. Production de bioéthanol à partir de ressources lignocellulosiques**

(Adapté de Hamelinck et al., 2005)

L'un des principaux défis de la commercialisation de l'éthanol cellulosique est l'impact de la modification de l'utilisation des terres. La production de cultures énergétiques dédiées nécessite une vaste superficie. Cependant, des pratiques de gestion des terres sont nécessaires pour réduire les émissions indirectes de carbone et d'azote qui constituent une menace pour produire des gaz à effet de serre nocifs. Cet inconvénient de la biomasse cellulosique a donné lieu à considérer la biomasse des algues comme une matière première potentielle pour la production de biocarburants.

#### 4.3.3. Bioéthanol à partir des algues (troisième génération)

La biomasse des algues peut être utilisée pour produire une variété de biocarburants tels que l'hydrogène, le diesel, l'isobutène et l'éthanol (Cruz et al., 2014; Mussatto et al., 2010; Nayak et al., 2014; Posten et Schaub, 2009).

Plusieurs études ont rapporté la production de bioéthanol à partir de la biomasse micro et macroalgique (Fasahati et al., 2015; Harun et al., 2010; Harun et al., 2014; John et al., 2011;

**Jung et al. , 2013).** L'amidon et la cellulose sont extraits de la biomasse d'algues en utilisant un cisaillement mécanique ou par hydrolyse enzymatique, après quoi ils sont utilisés pour la production de bioéthanol (**John et al., 2011**). L'hydrolyse enzymatique de la cellulose provenant des algues est plus simple que celle de la biomasse végétale due à une présence négligeable ou nulle de lignine dans les algues. On a signalé que diverses espèces d'algues contiennent différentes quantités d'amidon et de biomasse après extraction de l'huile (**John et al., 2011**). La production d'éthanol à partir d'amidon d'algues est similaire aux processus de conversion de l'amidon ou des sucres en éthanol discutés dans 4.3.1.

Les algues peuvent se développer sur des terres non cultivables sans modifier l'utilisation des terres. En outre, le CO<sub>2</sub> produit dans les gaz de combustion industriels peut être utilisé pour produire de la biomasse d'algues (**Brennan et Owende, 2010**). Un autre avantage principal de la biomasse algale est qu'il ne nécessite pas d'eau douce pour la culture. Les eaux usées industrielles et domestiques peuvent également être utilisées pour la culture de la biomasse algale (**Mussatto et al., 2010**).

Le principal obstacle à la commercialisation des biocarburants d'algues est le coût des procédés. La récolte correspond à 20 à 30% du coût total de la culture (**Demirbas et Fatih Demirbas, 2011**). La culture des microalgues à travers les étangs ouverts est économique, mais présente des inconvénients inhérents à la faible productivité, à la perte d'eau, à la faible consommation de CO<sub>2</sub> et à une grande affinité pour être contaminés par d'autres souches d'algues (**Chisti, 2007; John et al., 2011; Posten et Schaub, 2009**). Les inconvénients des étangs ouverts ont conduit au développement de photobioréacteurs fermés, ce qui facilite une productivité plus élevée, moins de contamination et moins de perte d'eau. Cependant, les photobioréacteurs souffraient de CO<sub>2</sub>, d'O<sub>2</sub> et de gradients de pH, de croissance de la paroi, d'encrassement, de stress hydrodynamique et de coûts élevés (**John et al., 2011**). Alors que les macroalgues ont récemment suscité un intérêt renouvelé en tant que matière première de bioéthanol; Son processus économique n'est pas entièrement abordé. Néanmoins, une récente évaluation quantitative de la durabilité sur les macroalgues a indiqué qu'elle avait un potentiel en tant que matière nutritive de bioéthanol durable (**Park et al., 2014**).

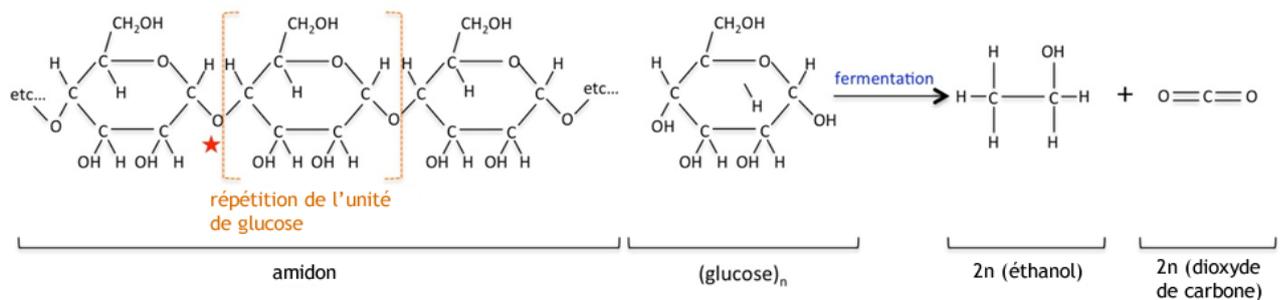
#### **4.4. Fermentation alcoolique par *S. cerevisiae***

La fermentation alcoolique est étudiée. Ce procédé concerne les déchets à forte teneur en glucides (amidons ou sucres libres). Ce procédé transforme des sucres fermentescibles par des levures en alcool et gaz carbonique avec dégagement de chaleur. Il existe un grand nombre de microorganismes utilisés pour la fermentation. Cependant peu sont réellement compétitifs en termes

de rendement en éthanol par rapport au substrat consommé, de capacité fermentaire, de tolérance élevée à l'éthanol et d'adaptation aux conditions de fermentation.

L'espèce la plus utilisée au niveau industriel est la *S. cerevisiae*. Elle transforme le glucose en éthanol. Actuellement, aucun autre micro-organisme n'atteint ses performances sur glucose en conditions non stériles, à savoir un rendement de l'ordre de 0,47 g d'éthanol par g de glucose, une productivité supérieure ou égale à 5 g/l.h, et des concentrations finales en éthanol voisines de 10% en volume. *S. cerevisiae* présente de nombreux atouts supplémentaires résultant de nombreuses années de sélection : résistance à l'éthanol, mise en œuvre industrielle aisée, etc. (J.C. Ogier, 1999).

La réaction de fermentation peut être modélisée ainsi :



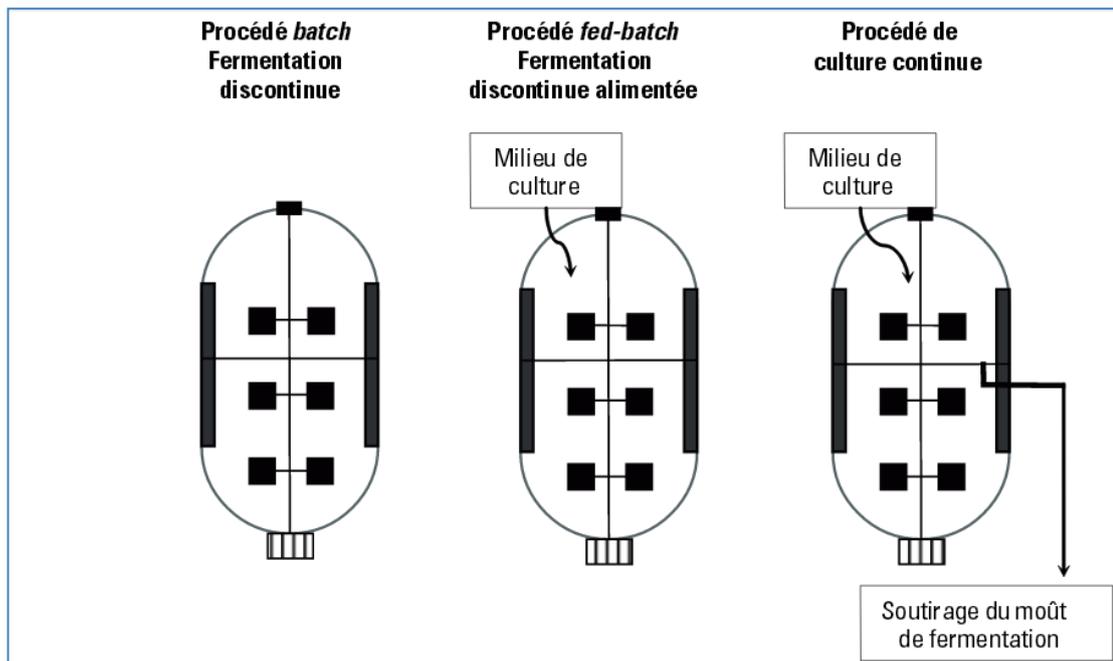
#### 4.5. Différents procédés de fermentation

Le bioéthanol est produit principalement par trois types de fermentation, discontinue (batch), semi-continue (fed-batch) et continue (M. Vitolo, 1996). (Figure 11).

##### 4.5.1. Le mode discontinu (ou batch)

Dans ce mode de fonctionnement la totalité des éléments nutritifs nécessaires à la croissance biologique est introduite lors du démarrage de la réaction. Aucun apport ni prélèvement (excepté bien sûr pour quelques mesures hors lignes éventuellement) n'est réalisé par la suite et la réaction se déroule à volume constant (Manyri, 2005). Les seules actions possibles de l'opérateur ne concernent que les variables d'environnement (pH, température, vitesse d'agitation, aération,...).

Peu de moyens sont ainsi nécessaires à sa mise en œuvre, ce qui en fait son attrait du point de vue industriel (Grisales Palacio, 2007). Il souffre cependant d'un inconvénient majeur : l'apport initial d'une quantité élevée de substrat inhibe généralement la croissance des microorganismes qui le consomment, ce qui se traduit par des durées de traitement allongées, et limite la charge initiale admissible (Queinnec, 2000).



**Figure 11. Les trois types du procédé de fermentation**

(Adapté de Queinnec, 2000)

#### 4.5.2. Le mode semi-continu (ou fedbatch)

Tout en nécessitant un dispositif de stockage des affluents, ce mode de fonctionnement se distingue du précédent par un apport des différents éléments nutritifs au fur et à mesure des besoins constatés des micro-organismes. La variation du volume du milieu réactionnel est donc une fonction directe de l'état d'avancement de la réaction.

Ce mode permet essentiellement d'éviter les problèmes d'inhibition associés au mode précédent, et de fonctionner à des taux spécifiques de croissance proches de leur valeur maximale.

A partir d'un volume initial préalablementensemencé, le réacteur est alimenté par un débit augmentant de façon exponentielle, nécessitant un contrôle en boucle fermée. C'est d'ailleurs ce dernier point qui a fortement limité l'utilisation du fedbatch en milieu industriel (Grisales Palacio, 2007) ; (Queinnec, 2000).

#### 4.5.3. Le mode continu

Caractérisé par un volume réactionnel constant, il est soumis à un soutirage de milieu réactionnel égal au flux d'alimentation en matière nutritive (en employant une régulation de niveau) (Demeyer et al.,1982).

Les procédés continus fonctionnent en régime permanent, en maintenant, pour des conditions d'alimentation fixées, le système dans un état stationnaire, en évitant tout phénomène inhibiteur grâce à l'effet de dilution dû à l'alimentation (**Grisales Palacio, 2007 ; Queinnec, 2000**). Ces modes de fonctionnement permettent en outre des productions importantes dans des réacteurs de taille réduite et ne nécessitent pas d'importants dispositifs de stockage en amont, contrairement aux modes précédents.

#### **4.6. L'extraction de l'éthanol**

La liqueur fermentée contient entre 8 et 15 % d'alcool. L'éthanol est séparé de la liqueur par un système de distillation à plusieurs colonnes qui fournit un alcool pur à 96 %.

Pour les besoins de commercialisation, l'éthanol est déshydraté par un tamis moléculaire. L'éthanol est alors dit « anhydre ». Un dénaturant y est ajouté en petite quantité (2 à 5 %) afin d'éviter qu'il soit commercialisé sur le marché de l'alimentation humaine.

L'éthanol et l'eau composent un azéotrope quand est atteinte une concentration en éthanol de 95,6% (w/w). Sa température d'ébullition à pression atmosphérique est alors de 78,2°C, pour 79°C concernant l'éthanol. Il est possible d'obtenir de l'éthanol pur en effectuant une distillation à une pression de 0,11 atmosphères, mais ce procédé est trop coûteux. Il est préférable d'effectuer deux étapes d'extraction.

Une première distillation classique est effectuée pour obtenir un mélange proche de la proportion azéotrope. Plusieurs solutions existent ensuite pour déshydrater ce mélange, la distillation azéotrope, la distillation extractive, la séparation sur tamis moléculaire ou la pervaporation.

Une distillation azéotrope consiste à introduire un solvant entraîneur qui va former un azéotrope ternaire dont la température d'ébullition est inférieure à l'azéotrope eau-éthanol.

La distillation de cet azéotrope ternaire va permettre d'obtenir de l'éthanol pur à plus de 99% en bas de colonne. Le distillat, contenant eau, éthanol et solvant extracteur, est divisé en deux phases par décantation. La phase contenant l'éthanol est renvoyée à la colonne de distillation azéotrope, la phase aqueuse subit une nouvelle distillation afin de séparer l'eau du solvant extracteur. Les solvants employés sont le cyclohexane, le diéthylether, le n-pentane, le benzène et le toluène. Ces deux derniers ne sont plus guère utilisés, du fait de leur toxicité, le cyclohexane étant privilégié pour les données concernant l'azéotrope eau-éthanol-cyclohexane.

La distillation extractive est une distillation effectuée avec un troisième constituant qui a le pouvoir d'inverser les températures relatives d'ébullition du mélange. Ainsi, la température d'ébullition de l'azéotrope n'est plus la plus faible. Ce troisième constituant peut être un liquide (l'éthylène glycol par exemple, ou l'essence en cas de production de carburant), un sel (acétate de potassium, acétate de sodium...), un liquide ionique ou des polymères. Une étape annexe est ici aussi nécessaire pour recycler le constituant ajouté.

Le procédé qui s'impose de plus en plus est la séparation sur tamis moléculaire. Il s'agit d'un tamis composés de zéolites, dont les pores ont un diamètre nominal de 0,30 nm. Les molécules d'éthanol (approximativement 0,44 nm de diamètre) sont retenues par ce tamis, alors que les molécules d'eau (0,28 nm de diamètre), plus petites, peuvent pénétrer les pores.

Cette technologie présente un excellent bilan énergétique de 0,1 à 0,2 MJ/kg d'éthanol pour une consommation totale (avec la première distillation) de 5 MJ/kg d'éthanol.

La séparation eau-éthanol peut également s'effectuer par des membranes par pervaporation. Des membranes hydrophiles ou hydrophobes existent. Ce procédé peut également être utilisé pendant la fermentation pour extraire l'éthanol en continu, et limiter ainsi son pouvoir inhibiteur.

## **CHAPITRE 2 : MATÉRIELS ET MÉTHODES**

---

## 5. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'ensemble des dispositifs expérimentaux et toutes les méthodes d'analyses utilisées.

### 5.1. L'amidon de pomme de terre

Pour réaliser cette étude, des déchets de pomme de terre ont été récupérés de l'usine de transformation de pomme de terre (Chips), SARL I.AGRO, située dans la zone industrielle de Rouiba. Le produit est commercialisé sous le nom commercial : **Vag d'or**®. Cette usine utilise des pommes de terres cultivées en Algérie et qui sont sélectionnées et triées à la main. L'amidon est récupéré séparément par le fabricant à partir des effluents des eaux de lavage lors des opérations de trempage et de découpage en tranche des tubercules de pomme de terre.

L'amidon de pomme de terre a été conservé à une température 4°C jusqu'à sa transformation et analyse. Ce mode de conservation permet de ralentir les changements chimiques et physiologiques (Magdy et al, 2001).

### 5.2. Microorganismes et milieu de culture utilisés pour la fermentation

Une souche de *Saccharomyces cerevisiae* (levure boulangère) a été utilisée pour la fermentation de l'hydrolysate de l'amidon de pomme de terre. La souche a été conservée sur gélose inclinée à 4 °C, pour garder la vitalité des microorganismes.

#### Milieu de pré-culture :

Le milieu de pré-culture utilisé est préparé à partir de l'eau distillée et il est composé de : extrait de malt (3 g/L), extrait de yeast (3 g/L), peptone (5 g/L) et glucose (20 g/L). Le milieu préparé est stérilisé à l'autoclave (Wise clave WISD 23) à 120 °C pendant 20 minutes.

#### Inoculum :

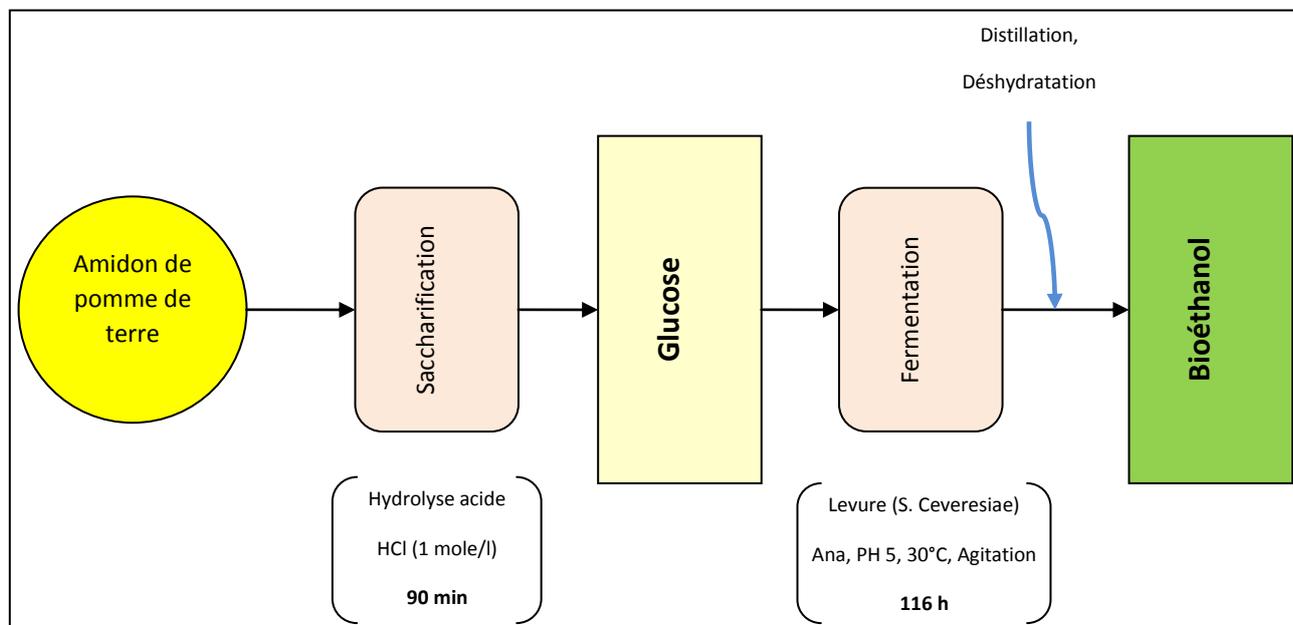
La préparation de l'inoculum a été réalisée en introduisant une masse de la souche *Saccharomyces cerevisiae* dans 100 ml de milieu de pré-culture précédemment préparé. Le mélange est homogénéisé et incubé à une température de 30 °C pendant 48h. L'inoculum ainsi préparé est conservé à une température voisine de 4 °C.

### 5.3. Production du bioéthanol

L'amidon de pomme de terre est une matière première qui nécessite un prétraitement, une hydrolyse pour obtenir du glucose. La fermentation alcoolique permettra de transformer le sucre en éthanol,

une distillation permettra de purifier le produit final. Les étapes de la production du bioéthanol sont (présentées dans la **Figure 12**) :

- (1) Hydrolyse acide
- (2) Fermentation alcoolique
- (3) Distillation



**Figure 12.** Les étapes de la production du bioéthanol à partir de l'amidon de pomme de terre

### 5.3.1. Hydrolyse acide de l'amidon de pomme de terre

L'hydrolyse acide est généralement utilisée pour décomposer les carbohydrates d'origine végétale pour la réduction des sucres simples sans effet adverse sur la matière. Durant l'hydrolyse, les carbohydrates contenus dans l'amidon de pomme de terre sont transformés en sucres fermentables.

Plusieurs études ont été réalisées afin d'optimiser le type et la quantité d'acide à utiliser pour l'hydrolyse ainsi que le rapport matière/acide. Le présent travail est basé sur le résultat de l'expérience réalisée par (**M.B. Tasić et al, 2009**), mais en substituant la purée de pomme de terre par l'amidon de pomme de terre. Ainsi, on a procédé à l'hydrolyse avec une solution de **HCl à 1M** et un rapport matière-acide **1:2 (p/v)**.

L'hydrolyse a été effectuée dans un monocolé de 2 L équipé d'un condenseur à reflux. Le chauffage est assuré par un chauffe-ballon. Dans un premier temps, la solution d'acide (HCl, 1M, 500 ml) est versé dans le ballon et chauffé jusqu'à ébullition puis une quantité de 250 g d'amidon de pomme de terre est ajoutée à la solution acide. Le tout est porté à reflux pendant 30 minutes. Des échantillons

ont été prélevés chaque 10 min, neutralisés avec du KOH 5M et centrifugés à 3000 tr/min pendant 15 min. Le surnageant obtenu est récupéré pour être analysé par HPLC.

### 5.3.2. Fermentation de l'hydrolysate de l'amidon de pomme de terre

La solution obtenue après hydrolyse acide de l'amidon de pomme de terre est stérilisée à 120 °C pendant 20 min dans un autoclave de type (Wise clave WISD 23). Puis refroidie à la température ambiante avant d'être utilisée comme moût de fermentation.

Le moût obtenu est transféré dans un fermenteur à double paroi de 2 litre (Figure 13) et inoculé avec du levain (l'inoculum). L'agitation est assurée avec un agitateur mécanique (100 tr/min) et la température de fermentation est fixée à 30°C à l'aide d'un bain-marie relié au fermenteur. La fermentation se déroule en anaérobie non stricte durant 116h. Des prélèvements sont réalisés et analysés afin de suivre l'évolution de la fermentation.



Figure 13. Dispositif utilisé pour la de fermentation (Original)

### 5.3.3. Récupération de l'éthanol par distillation

Après fermentation, l'éthanol se trouve dans un moût contenant principalement de l'eau et des composés provenant de la dégradation de la biomasse, des substances ajoutées au cours du procédé mais également d'autres molécules produites par les micro-organismes simultanément à la production d'éthanol, comme les alcools supérieurs.

Le moût est placé dans un ballon chauffé à environ 78°C (voir le dispositif de distillation, **Figure 14**).



**Figure 14. Dispositif de distillation (Original)**

La vapeur s'élèvera dans la colonne à distiller, se condensera (passage de vapeur à liquide) et redescendra en début de colonne pour s'évaporer à nouveau. Ce déplacement gazeux, appelé reflux, se répétera quelques fois selon le pourcentage d'éthanol obtenu par la fermentation.

Cette opération de séparation, basée sur la volatilité de l'alcool, permet de passer d'une solution de 10 à 94 °GL en éthanol (**Isabelle Didderen et al. 2008**).

#### **5.4. Les méthodes analytiques**

Pour suivre l'évolution des différents paramètres de la fermentation, des prélèvements de 10 ml du moût sont réalisés périodiquement et ce en vue de déterminer le pH, le °Brix, la densité des microorganismes, le taux des sucres réducteurs et totaux et le degré de l'alcool au cours de la fermentation.

##### **5.4.1. Détermination de la teneur en matière sèche et en eau**

La teneur en eau est définie comme étant la perte de poids subie lors de la dessiccation. Pour cela, une quantité de 30 g d'amidon de pomme de terre a été pesée dans un récipient préalablement tarée.

L'échantillon a été placée ensuite pendant 24 heures dans une étuve (MEMMERT) à 105 °C. Après refroidissement dans un dessiccateur 30 minutes, l'ensemble a été pesé à nouveau à la balance électronique (KERN 572). L'opération a été répétée jusqu'à l'obtention d'un poids constant.

La teneur en eau est calculée par la formule suivante :

$$H\% = (M1-M2) / PE \times 100$$

H% : Teneur en eau.

M1 : Poids du récipient + échantillon avant dessiccation.

M2 : Poids du récipient + échantillon après dessiccation.

PE : Prise d'essai.

La matière sèche (MS) est obtenue comme suit :

$$(MS) \% = 100 - H\%$$

### 5.4.2. Détermination du pH

La détermination du pH est essentielle pour le contrôle de la fermentation microbienne. Sa variation renseigne sur l'activité métabolique de la microflore. Le pH est déterminé par une lecture directe sur un pH-mètre (OHAUS STARTER 3100 C) préalablement étalonné. La mesure a été réalisée en plongeant l'électrode du pH mètre dans la solution.

### 5.4.3. Détermination de la DO des microorganismes

Afin de suivre l'évolution de la croissance de la population microbienne, on procède à la mesure de la DO à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible de type (PERKIN Elmer Lambda 25) à 620 nm.

### 5.4.4. Détermination du taux de solides solubles (TSS ou °Brix)

Le taux de solides solubles (TSS), exprimé en degré Brix, est déterminé au cours de la fermentation à l'aide d'un réfractomètre manuel (Scihemtech). C'est la technique la plus employée car la plus simple, la plus rapide et la moins coûteuse.

### 5.4.5. Détermination du taux des sucres réducteurs

Les sucres réducteurs sont déterminés par la méthode de **Miller (1959)**. La fonction réductrice se complexe sous certaines conditions avec le réactif de DNS, ce qui se traduit par une coloration orangée. L'intensité de cette coloration est proportionnelle à la teneur en sucres réducteurs.

Une série de concentrations de la solution standard de glucose à 10 g/l a été utilisée pour établir une gamme étalon. Un volume de 1 ml de réactif DNS (Acide 3,5 Dinitrosalicylique) a été ajouté aux différentes concentrations de glucose (1ml). On porte les tubes au bain-marie à 100°C pendant 5 min puis dans l'eau glacée pour refroidissement. On pourra, finalement lire les absorbances sur le spectrophotomètre UV-Visible (PERKEN Elmer Lambda 25) à 540 nm. On procède de la même façon pour les échantillons prélevés au cours de la fermentation. Les absorbances ont été lues contre le blanc (DNS pur). Les concentrations en sucres réducteurs sont calculées à partir de la courbe d'étalonnage (**Annexe 1** : *Courbe d'étalonnage du glucose par DNS, méthode de Miller (1956)*)

### **5.4.6. Analyse par HPLC (High-performance liquid chromatography)**

La chromatographie liquide à haute performance, est une technique qui nous a permis de quantifier les concentrations en glucose et en éthanol. Les deux composés ont fait l'objet d'un étalonnage qui a été réalisé à partir de solutions contenant les deux composés à analyser dans des gammes de concentrations variables. Les échantillons prélevés de l'hydrolyse de l'amidon de pomme de terre et de la fermentation à différents intervalles sont centrifugés à 3000 tr/min pendant 15 min et le surnageant est ensuite filtré avec des filtres seringues de 0.45 µm et dilué avant d'être analysés avec la HPLC JASCO LC Net II/ADC équipé d'un détecteur RI (JASCO RI 4030).

Une colonne échangeuse d'ions (EuroKat. H-KNAUER) est utilisée, la phase mobile est une phase polaire constituée d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) à une concentration 5 mM circulant à un débit de 0,6 ml/mn pendant toute la durée de l'acquisition. La température de la colonne est fixée à 60°C (**E1758 – 01 (2015)**).

L'acquisition et le traitement des données se font par un logiciel spécialisé permettant de calculer la surface des pics détectés. Cette surface est corrélée à une valeur de concentration par l'intermédiaire d'une droite de calibration déterminée préalablement pour les deux composés. (Voir Annexe I, les courbes d'étalonnage).

## **CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION**

---

## 6. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 6.1. Caractéristiques de l'amidon de pomme de terre

#### 6.1.1. Aspect

La pomme de terre semblait être une source de sucre très riche. Le principal élément est l'amidon (75 à 80 % de la matière sèche)<sup>11</sup>, qui peut être hydrolysé en glucose. L'amidon de pomme de terre récupéré de l'industrie de chips qu'on a utilisé dans notre étude a été conservé à 4°C au niveau du laboratoire de biomasse du CDER. L'amidon de pomme de terre est une pâte de couleur blanche jaunâtre de texture longue. Il est représenté dans la **Figure 15** suivante :



**Figure 15. L'amidon de pomme de terre avant hydrolyse acide**

#### 6.1.2. Détermination de la teneur pondérale en matière sèche et en eau

Le taux de matière sèche obtenu est de 48.7% et le taux d'humidité est de 51.3%.

La valeur de la teneur en eau peut s'expliquer par le fait que l'amidon utilisé dans ce travail est pris dans son état brut sans aucun prétraitement. La teneur en eau est aux environs de 10% pour l'amidon de pomme de terre caractérisé dans le travail de **(H.-J. Chung et al., 2014)** et elle varie entre 14.57 et 18,82 % dans le travail de **(Sonia Patricia Lizarazo H. et al. 2015)** pour plusieurs variétés de pomme de terre.

<sup>11</sup> Consensus Document on Compositional Considerations for New Varieties of Potatoes: Key Food and Feed Nutrients, Anti-nutrients and Toxicants ([http://www.olis.oecd.org/olis/2002doc.nsf/43bb6130e5e86e5fc12569fa005d004c/4091cf51091a9e4bc1256b3c00403dc7/\\$FILE/JT00119165.PDF](http://www.olis.oecd.org/olis/2002doc.nsf/43bb6130e5e86e5fc12569fa005d004c/4091cf51091a9e4bc1256b3c00403dc7/$FILE/JT00119165.PDF)), 9 janvier 2002, OCDE. Consulté le 25 décembre 2009

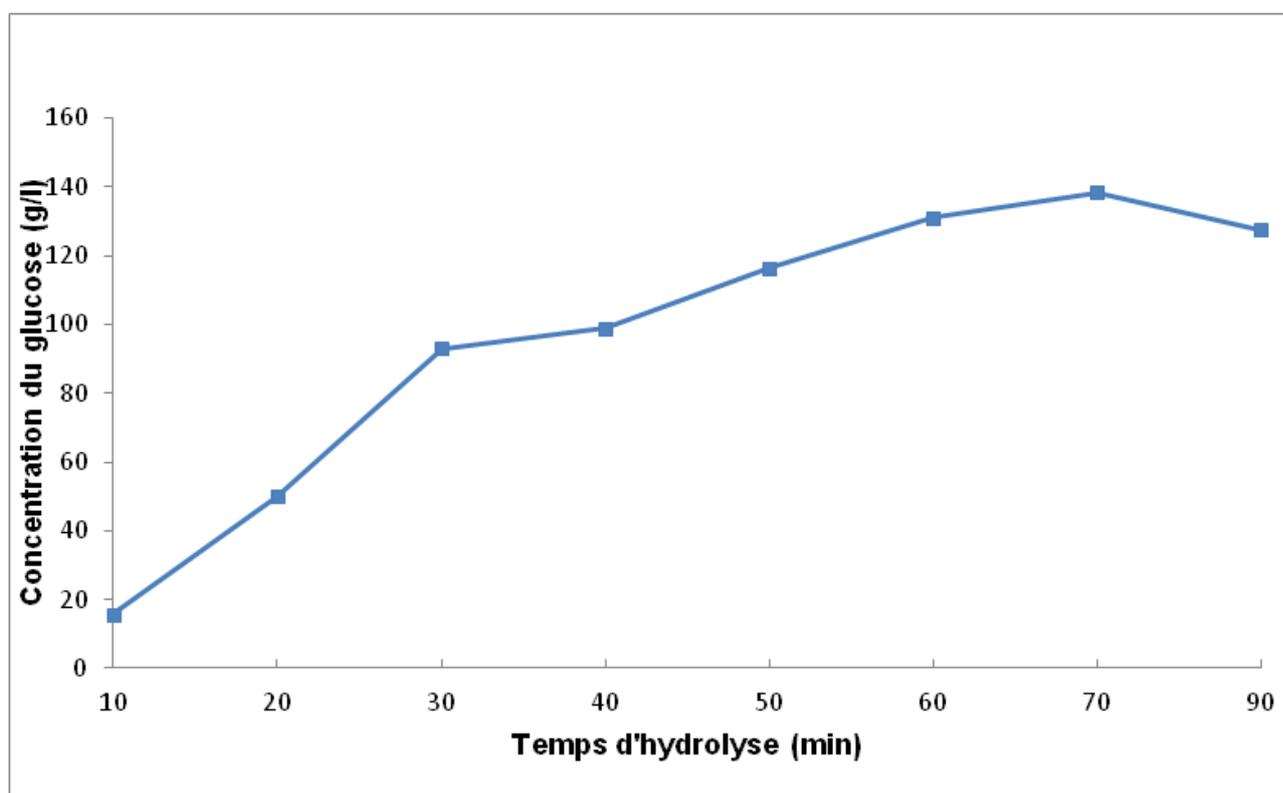
## 6.2. Production du bioéthanol

La production de bioéthanol est réalisable en procédant à la fermentation en milieu anaérobique de monomères de D-glucose. Étant donné que notre étude consiste à produire du bioéthanol à partir de l'amidon de pommes de terre, il est nécessaire de transformer préalablement l'amidon en unités distinctes de D-glucose. Cette étape de transformation, s'appelle l'hydrolyse. Elle est suivie d'une étape de fermentation et une distillation pour récupérer le bioéthanol.

### 6.2.1. Hydrolyse acide de l'amidon de pomme de terre

Il existe plusieurs types d'hydrolyses dont la saponification, l'hydrolyse acide et l'hydrolyse enzymatique, aussi connue sous le nom de saccharification. Dans notre cas, l'hydrolyse acide avec de l'acide chlorhydrique sera utilisée.

La **Figure 16** illustre l'évolution de la concentration du glucose au cours de l'hydrolyse de l'amidon de pomme de terre en utilisant une solution de HCl 1M.



**Figure 16. Évolution de la teneur en glucose durant l'hydrolyse**

La concentration en glucose augmente durant l'hydrolyse et commence à se stabiliser au bout de 60 min pour marquer un maximum au bout de 70 min et atteindre **127,55 g/l** après 90 min tandis que la concentration en sucres réducteurs, déterminé par la méthode de Miller est de **(159,32 g/l)** (voir

6.2.2.3). Cette tendance est en accord avec les résultats trouvés par (M.B. Tasić et al, 2009) qui démontre que les conditions optimales pour l'hydrolyse acide sont achevées en utilisant une solution de HCl 1M et un rapport de matière 1:2 (p/v).

En effet, dans le travail de (M.B. Tasić et al, 2009), c'est la purée de pomme de terre qui a été hydrolysée tandis que dans notre travail, c'est l'amidon de pomme de terre qui a subi l'hydrolyse. Ceci explique la valeur nettement supérieure de la teneur en glucose trouvée dans notre expérience par rapport à la valeur de la concentration en sucres réducteurs dans le travail de (M.B. Tasić et al, 2009) qui est de 73 g/l.

Une autre étude (B.J. Khawla et al, 2014), où l'épluchure de pomme de terre (contenant 48,46 % d'amidon dans la matière sèche) a été hydrolysée, la concentration du glucose obtenue été de (62g/l) en utilisant une solution de HCl à 5% pendant 120 min. cette quantité est trois fois plus grande que celle trouvée dans le travail de (D. Arapoglou et al, 2010) et qui été de (19,37 g/l) après l'hydrolyse de l'épluchure de pomme de terre (contenant 52,14 % d'amidon dans la matière sèche) mais en utilisant une solution de HCl 0,5 M à 121°C pendant 15 min.

### 6.2.2. Caractéristiques physico-chimique de l'hydrolysats de l'amidon de pomme de terre

Les résultats des analyses physico-chimiques de l'hydrolysats de l'amidon de pomme de terre sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau 5. Paramètre physico-chimique de l'hydrolysats de pomme de terre**

Paramètres	Valeur
pH	5
TSS (°Brix)	16,2 %
Sucres réducteurs	159,32 g/l
Glucose	127,55 g/l

#### 6.2.2.1. Détermination du pH

La mesure a été réalisée en plongeant l'électrode du pH mètre dans la solution d'hydrolysats de l'amidon de pomme de terre.

$$\boxed{\text{pH} = 5}$$

### 6.2.2.2. Détermination du taux de solides solubles (TSS ou °Brix)

Le degré Brix a été lu directement sur l'échelle à l'intersection de la limite entre la frange claire et la frange foncée du réfractomètre du laboratoire de bioénergie, CDER.

$$\boxed{\text{°Brix} = 16,2\%}$$

### 6.2.2.3. Détermination du taux des sucres réducteurs

Les sucres réducteurs sont déterminés par la méthode de **Miller (1959)** décrite en haut.

La lecture des absorbances pour la gamme d'étalonnage et l'hydrolysate se fait sur le spectrophotomètre à 540 nm contre le blanc (DNS pur). La concentration en sucres réducteur peut être alors déduite à partir de la courbe d'étalonnage (**Annexe 1**) :

$$\boxed{[\text{Sucres réducteurs}] = 159,32 \text{ g/l}}$$

### 6.2.2.4. Analyse par HPLC (High-performance liquid chromatography)

L'échantillon à analyser est centrifugé à 3000 tr/min pendant 15 min et le surnageant est récupéré et dilué 10 fois pour l'analyser par HPLC. La concentration en glucose peut être alors déduite à partir de la courbe d'étalonnage (**Annexe 2**) :

$$\boxed{[\text{Glucose}] = 127,55 \text{ g/l}}$$

## 6.2.3. Fermentation alcoolique de l'hydrolysate de l'amidon de pomme de terre

Nous avons suivie quelques paramètres essentiels qui nous renseignent sur l'évolution de la fermentation dont l'évolution de la population microbienne, le pH, l'assimilation des sucres et la production d'éthanol durant la fermentation.

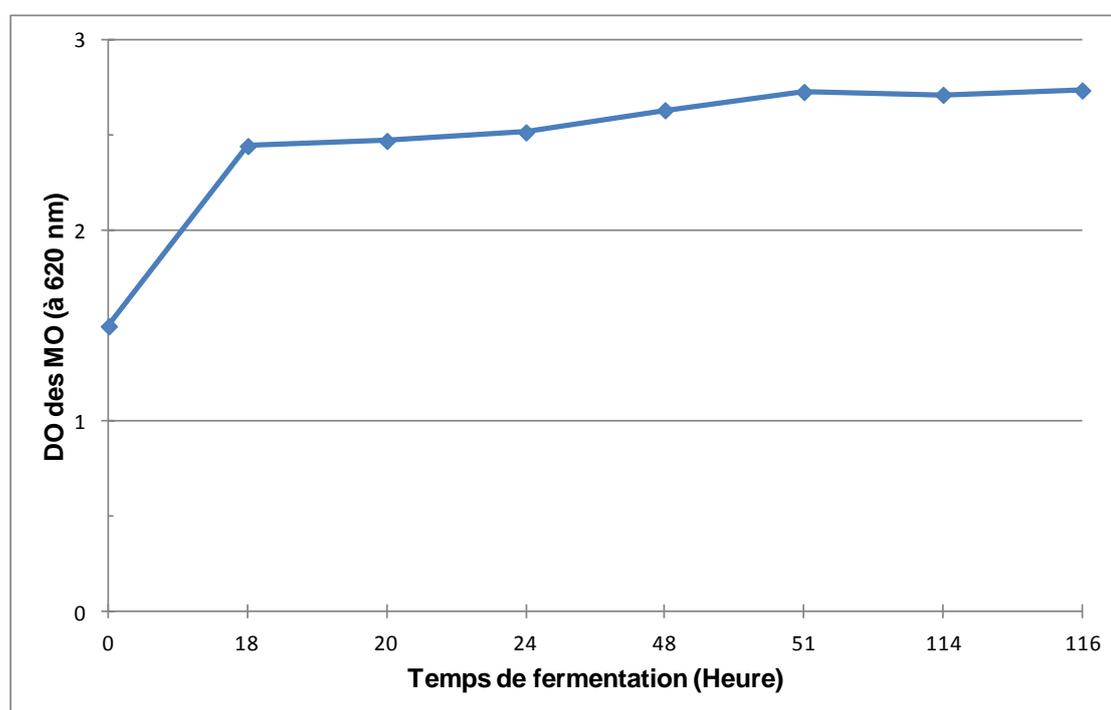
### 6.2.3.1. Évolution de la population microbienne durant la fermentation

La **Figure 17** illustre l'évolution des populations microbiennes de la levure *S. cerevisiae* durant la fermentation.

La densité des cellules microbiennes augmente drastiquement durant les premières 18 heures, ce qui correspond à la phase de croissance qui dure jusqu'à l'obtention de la population maximale, soit généralement jusqu'à 20 à 30 % de la fermentation. Elle devient, ensuite, presque stationnaire entre 18 et 24 heures. Durant cette période de croissance, des concentrations relativement faibles d'éthanol s'étaient accumulées (18,79 g/l). Ce phénomène correspond à celui trouvé par (**K. M.**

**Domberk et L. O. Ingram, 1987**) où l'état stationnaire de la croissance de la levure *S. cerevisiae* a été observé dès 18 heures de fermentation et une faible concentration en éthanol (<5% (v/v)).

Une augmentation légère de la croissance est enregistrée entre 24 et 51 heures de fermentation pour marquer un autre palier où la concentration maximale d'éthanol produit est enregistré à 114 heures. C'est pendant cette phase que l'essentiel du sucre est fermenté, les levures ne se multiplient plus et leur activité diminue régulièrement même si leur viabilité reste généralement supérieure à 80-90 %, excepté dans les cas d'arrêts de fermentation. Cette baisse d'activité correspond à une diminution régulière de la vitesse de transport des sucres (**Salmon et al., 1993**). Ce résultat est en accord avec la constatation de (**Qi Zhang et al, 2015**).



**Figure 17. Évolution de la population microbienne durant la fermentation**

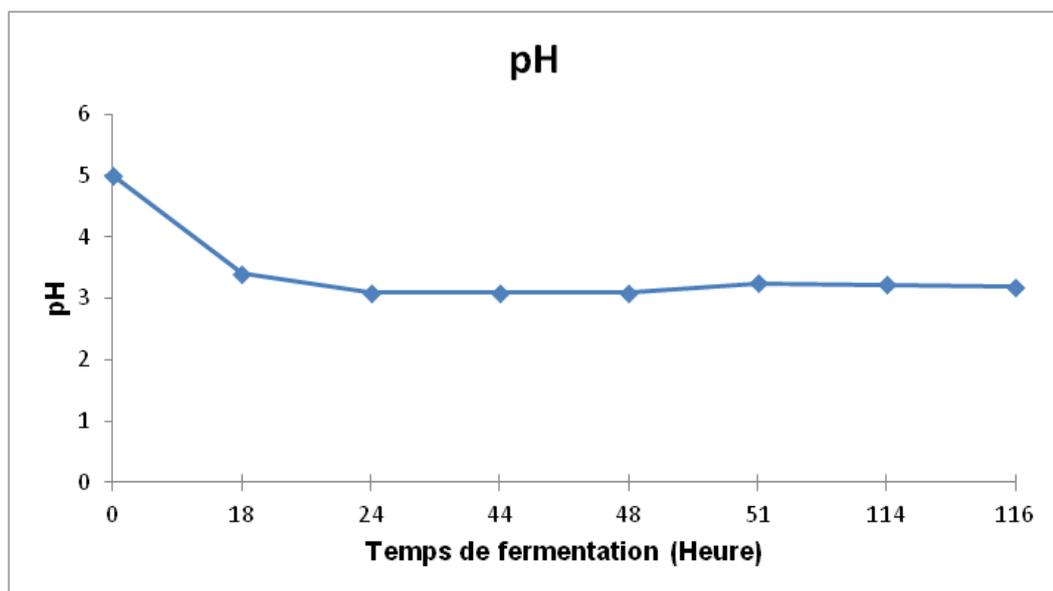
Plusieurs mécanismes d'inhibition sont impliqués, mettant en jeu les acides gras à moyenne chaîne, les toxines killer, etc., mais c'est l'éthanol qui joue le rôle essentiel. Dans le travail de (**K. M. Domberk et L. O. Ingram, 1987**), il a été expliqué que l'exposition des cellules à l'éthanol a, en quelque sorte, endommagé leur capacité à produire de l'éthanol. L'ampleur de ce dommage apparaît liée à la fois à la concentration d'éthanol et à la durée d'exposition.

En effet, après 114 heures, la quantité même de l'éthanol produit est réduite comme expliqué par (**Abul Kalam Azad et al, 2014**), ceci est détaillé dans le paragraphe 6.2.3.6 ci-dessous.

### 6.2.3.2. Évolution du pH durant la fermentation

La **Figure 18** montre l'évolution du pH au cours de la fermentation.

Au cours de la fermentation, le pH diminue durant les premières 18 heures jusqu'à atteindre une valeur de 3.09. Cette chute du pH s'explique par l'assimilation de la source azotée par les levures. **Akin (2008)**. Une stabilisation de la valeur de pH dans les 24 heures suivantes suivie d'une légère augmentation (aux environs 3.20) jusqu'à la fin de la fermentation. La remontée par contre est due à un phénomène physico-chimique. La production d'alcool à partir des sucres entraîne une modification des dissociations des constituants du moût et principalement des acides organiques présents initialement dans le moût. En présence d'éthanol, la dissociation est moins importante et il en résulte donc une concentration en protons plus faible et donc un pH plus élevé. Il a été montré que ces deux phénomènes (assimilation de l'azote et effet de l'éthanol sur les dissociations) sont les principaux responsables de l'évolution du pH lors de la fermentation des moûts.



**Figure 18. Évolution du pH durant la fermentation**

Il a été montré que le pH optimal de croissance des levures est de 3.5 à 3.8 (**Gray, 1984**). Dans un milieu à pH supérieur à 7 ou inférieur à 2.9, une inhibition de la croissance et de la production d'alcool est observée (**Jones et al, 1981, winter, 1988**).

### 6.2.3.3. Évolution du taux de solides solubles (TSS ou °Brix)

La **Figure 19** montre l'évolution du taux de solides solubles (exprimé en °Brix) qui est resté en diminution au cours de la fermentation.

Le °Brix de l'hydrolysate de l'amidon de pomme de terre été à 16,2 % avant la fermentation pour être réduit à 7,2 % après 116 heures de fermentation ce qui s'explique par la transformation des sucres en éthanol par la levure *S. cerevisiae*.

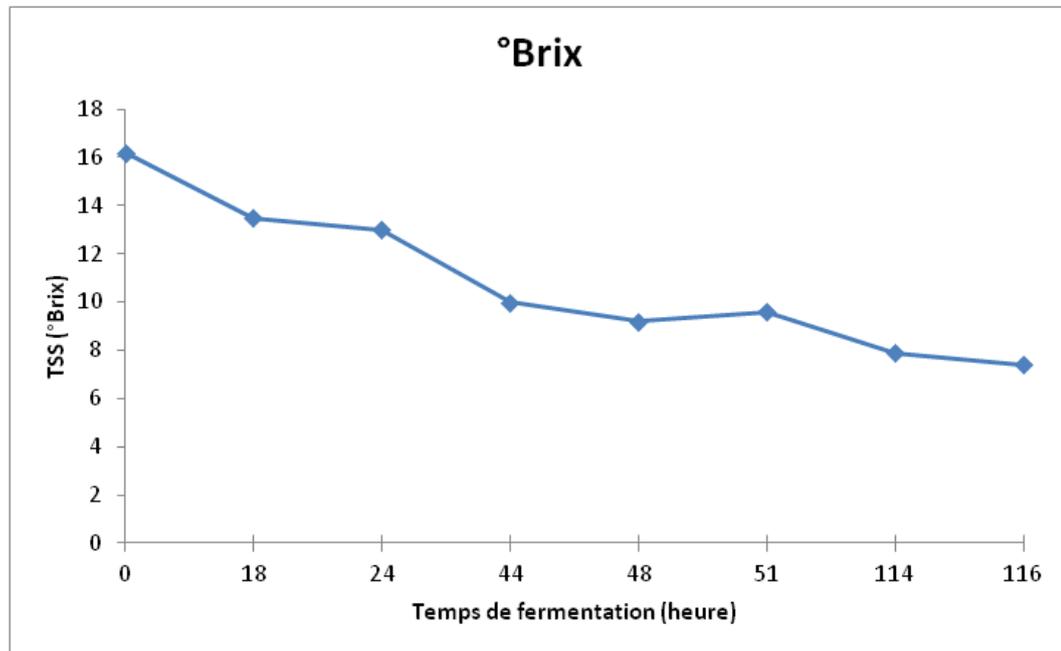


Figure 19. Évolution du TSS (°Brix) durant la fermentation

#### 6.2.3.4. Évolution de la teneur en sucre réducteur

Les concentrations en sucres réducteurs ont été déterminées par la méthode de **Miller (1959)**. L'évolution de la teneur des sucres réducteurs pendant la fermentation est illustrée dans la **Figure 20**.

Durant les premières 24 heures, une augmentation rapide du taux des sucres réducteurs est observée. Cette augmentation est expliquée par la libération des sucres réducteurs par hydrolyse des polysaccharides pariétaux sous l'action des enzymes contenus dans le ferment (**VANBELLE et coll., 1994**). Cette augmentation est suivie d'une chute de la teneur en sucres réducteurs jusqu'à la fin de la fermentation. La fermentation des sucres en éthanol par *S. cerevisiae* explique cette diminution.

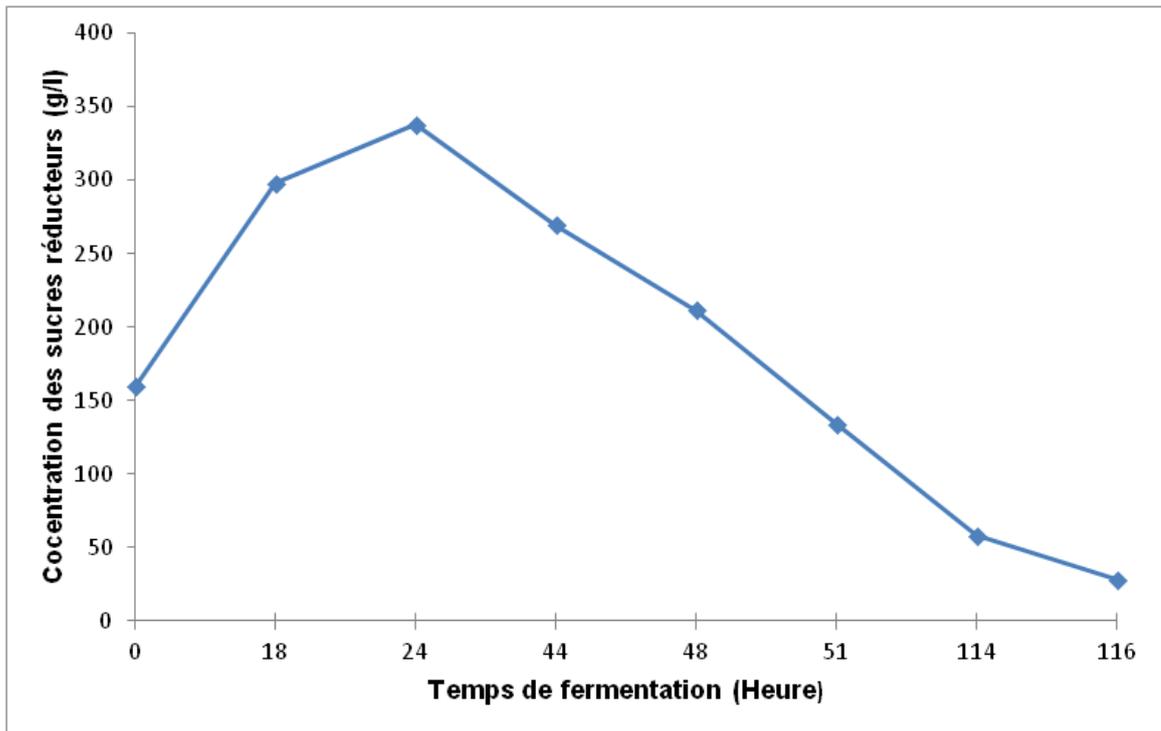


Figure 20. Évolution de la teneur en sucre réducteur durant la fermentation

#### 6.2.3.5. Évolution de la teneur en éthanol durant la fermentation

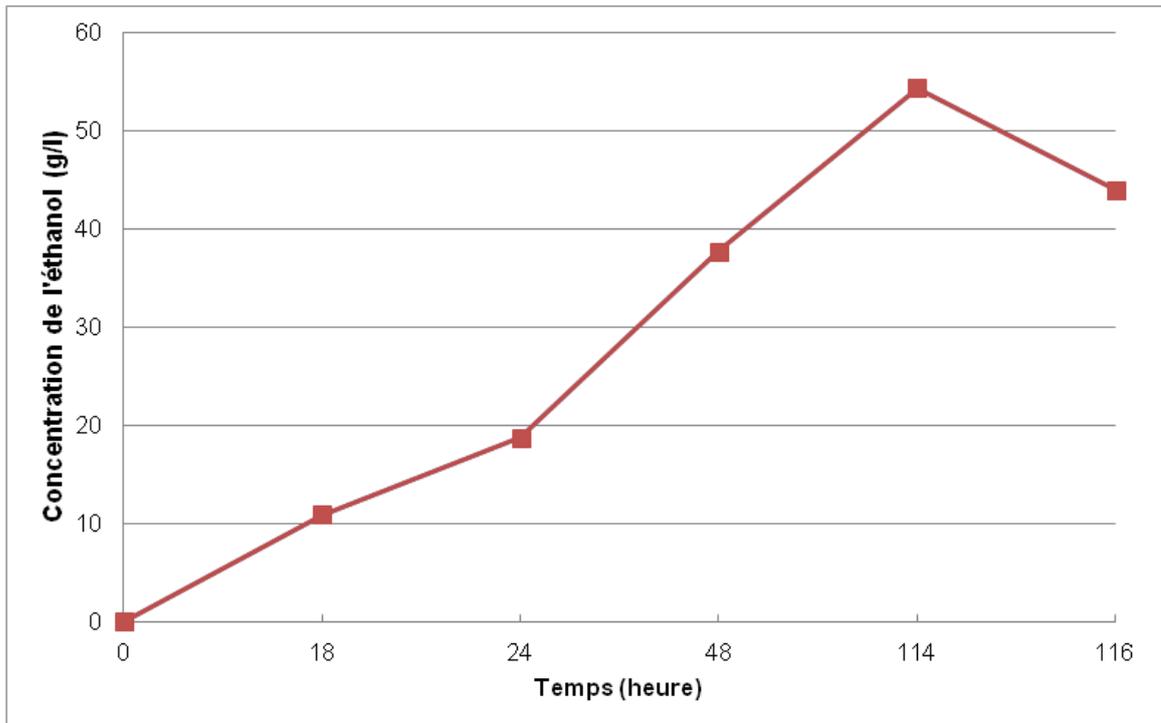


Figure 21. Évolution de la teneur en éthanol durant la fermentation

La Figure 21 illustre l'évolution de la teneur en éthanol produit pendant la fermentation.

La quantité d'éthanol produit augmenter durant fermentation jusqu'à 114 heures (4,5 jours de fermentation) pour diminuer après. Cette diminution est expliquée par une présence probable de protéines et des graisses avec l'amidon de pomme de terre. L'énergie générée par les protéines et les graisses aide la levure à convertir l'éthanol en d'autres produits (Abul Kalam Azad et al, 2014).

### 6.2.3.6. Cinétique de la fermentation

La cinétique de la fermentation de l'amidon de pomme de terre et la production de l'éthanol est illustrée dans la **Figure 22**.

Au cours du premier jour de la fermentation, on observe une augmentation de la quantité de sucres réducteurs. Cette augmentation est expliquée par la libération des sucres réducteurs par hydrolyse des polysaccharides pariétaux sous l'action des enzymes contenus dans le ferment. En effet, l'amidon de pomme de terre n'a pas été hydrolysé complètement durant l'hydrolyse acide et on suppose que le processus a continué pendant le premier jour de la fermentation (VANBELLE et coll., 1994).

Durant cette même période, la quantité de glucose a diminuée en passant de (127,55 g/l) à (78,42 g/l) tandis que la quantité d'éthanol produite augmentait pour atteindre (18,79 g/l).

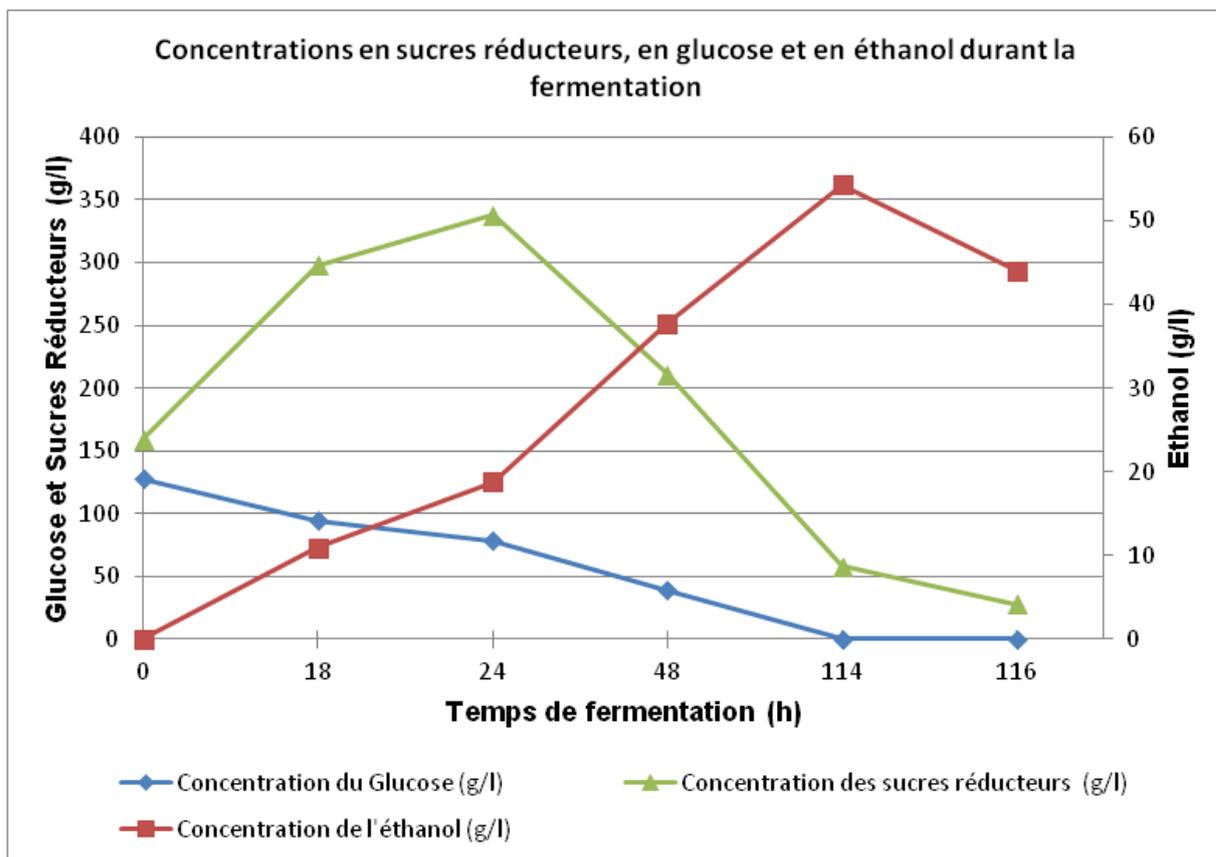


Figure 22. Cinétique de la fermentation

Ce résultat est nettement plus grand que celui trouvé par **(B.J. Khawla, 2014)** pour l'épluchure de pomme de terre (6,45 g/l) après 26 heures de fermentation ou encore de **(Hashem et al, 2010)** qui était de (5,52 g/l) pour la vapeur d'amidon résiduelle.

En comparant nos résultats de fermentation de l'amidon de pomme de terre hydrolysé avec une solution de HCl 1M (rapport de la purée de pomme de terre au volume d'acide de 1:2 (p/v)) et celles de **(M.B. Tasić et al, 2009)** pour la fermentation de la purée de pomme de terre hydrolysée avec une solution de HCl 1M (rapport de la purée de pomme de terre au volume d'acide de 1:1 (p/v)), la quantité d'éthanol produite pour **(M.B. Tasić et al, 2009)** est de (31,2 g/l) durant 18 heures de fermentation pour augmenter légèrement pour marquer un palier et atteindre (32,9 g/l) au bout de 33 heures de fermentation qui est approximativement la même valeur trouvée dans notre travail (32,84 g/l) après 42 heures de fermentation mais sans marquer un palier. En effet, la quantité d'éthanol continue à augmenter durant le reste de la durée de fermentation jusqu'à 114 heures (4,5 jours de fermentation) pour diminuer après.

Après le premier jour de fermentation, la quantité des sucres réducteurs marque une diminution drastique enregistrant ainsi la fin du processus d'hydrolyse et qui est reflété par l'augmentation rapide de la quantité d'éthanol produite qui passe de (18,79 g/l) le premier jour de fermentation à (37,70 g/l) à la fin du deuxième jour pour atteindre sa valeur maximale de (54,31 g/l) au bout de 4,5 jours de fermentation pour diminuer après.

La diminution de la quantité d'éthanol a été observée aussi par **(D. Arapoglou et al, 2010)** après 60 heures de fermentation des épluchures de pomme de terre et par **(B.J. Khawla, 2014)** après 26 heures de fermentation des épluchures de pomme de terre également.

Il est à noter que les sucres réducteurs n'ont pas été consommés en totalité par la levure *S. cerevisiae* où la teneur des sucres réducteurs analysé par la méthode de Miller été de (58,19 g/l) au bout de 4,5 jours de fermentation, et qui correspond à la concentration maximale d'éthanol obtenu, pour atteindre (27,98 g/l) à la fin de fermentation. Cependant, presque toute la quantité de glucose a été consommée durant la fermentation, seulement des traces ont été trouvées par HPLC après 4,5 jours de fermentation. Cela peut être dû à l'arrêt de la croissance de la levure *S. cerevisiae* par accumulation de substances toxiques.

En effet, **(Qi Zhang et al, 2015)** ont constaté que le produit final de la fermentation, l'éthanol, lui-même est le principal facteur inhibant la croissance de la levure et l'activité de fermentation, car la levure cesserait complètement de croître et de fermenter lorsque la concentration initiale en éthanol exogène dépassait 70 g/l (~9%).

D'autre part, **Hayashida (1981)** a montré que des concentrations même faibles en alcool (inférieur à 6%) entraînent une inhibition partielle et irréversible de l'hexokinase.

En général, pour la production d'éthanol par les levures la durée maximale de fermentation en discontinu est de 72 heures (**Phisalaphong M et al, 2006**), ce qui suppose la création d'un palier entre 48 et 114 heures et qui n'est pas mis en évidence dans ce travail. Ceci est supporté par la consommation presque totale du glucose déjà à 114 heures.

Par contre, une durée plus longue, au-delà de 114 heures (~4,5 jours) dans ce travail, réduit la production de bioéthanol. Ce résultat est en accord avec celui rapporté par (**Abul Kalam Azad et al, 2014**) observé après 6 jours de fermentation de pomme de terre et peut être expliqué par une présence probable de protéines et des graisses avec l'amidon de pomme de terre. L'énergie générée par les protéines et les graisses aide la levure à convertir l'éthanol en d'autres produits.

### 6.2.3.7. Évolution du degré d'éthanol après distillation

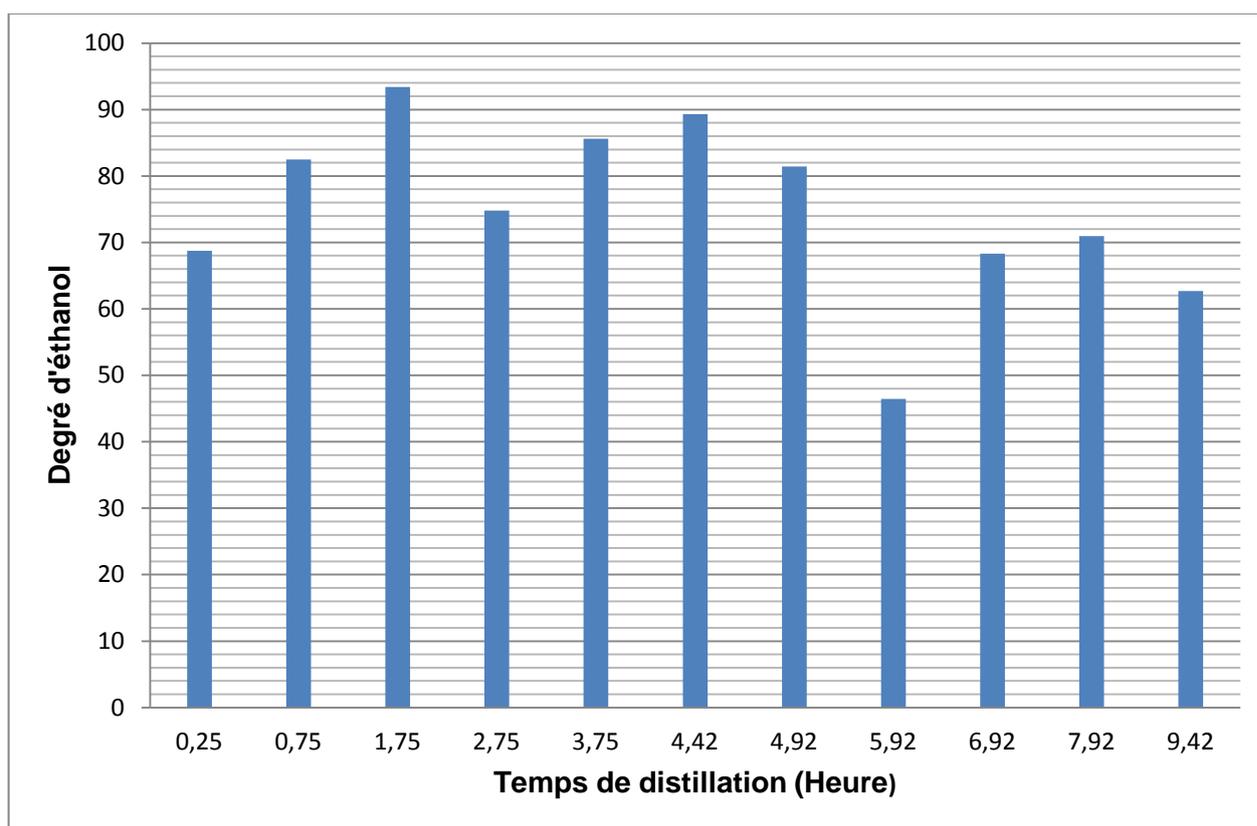


Figure 23. Degré d'éthanol au cours de la distillation

On a placé 700 ml de moût dans un ballon chauffé à environ 78°C et on a essayé de maintenir cette température pendant toute la période de distillation. Après 15 minutes de distillation, on récupère 1 ml de distillat pour être analysé par HPLC afin de déterminer la quantité d'éthanol et le degré

d'alcool par conséquent, cette opération est répétée plusieurs fois jusqu'à la fin de la distillation après 9 heures approximativement.

La **Figure 23** illustre les différentes valeurs du degré d'éthanol au cours de la distillation. Le premier distillat (après 15 min) présentait un degré d'éthanol de 68,74° tandis que le dernier était à 62,70°. Le maximum est enregistré après 100 minutes de distillation (**93,41°**).

Le volume de distillat obtenu est de 65 ml ce qui représente un rendement de 9,3 % (v/v) d'éthanol produit.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

---

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le présent travail, l'amidon de pomme de terre issu des déchets de l'industrie de transformation de pomme de terre en chips a été utilisé comme matière première pour la production du bioéthanol. Le choix de la pomme de terre est justifié par son abondance en Algérie, étant la première culture maraîchère du point de vue superficie et production où une quantité importante est réservée à un usage alimentaire. On a pensé qu'il serait alors plus judicieux de produire l'éthanol à partir des déchets de pomme de terre.

L'amidon de pomme de terre utilisé dans ce travail est pris dans son état brut sans aucun prétraitement avant de subir une hydrolyse acide par HCl. L'hydrolyse acide a permis de libérer 159,3 g/l de sucres réducteurs pour produire 54,3 g/l d'éthanol après fermentation. Finalement, l'éthanol a été récupéré par distillation permettant de passer de 6,8° à 93,4° d'alcool.

Pour conclure, les résultats obtenus par le présent travail démontrent que l'amidon de pomme de terre, issu des déchets de l'industrie de transformation de pomme de terre, a un grand potentiel pour la production de l'éthanol. L'amidon de pomme de terre utilisé dans ce travail est pris dans son état brut sans aucun prétraitement avant de subir une hydrolyse acide par HCl. L'hydrolyse acide a permis de libérer 159,3 g/l de sucres réducteurs pour produire 54,3 g/l d'éthanol après fermentation. Finalement, l'éthanol a été récupéré par distillation permettant de passer de 6,8° à 93,4° d'alcool.

Le bioéthanol peut être utilisé comme biocarburant soit seul ou avec de l'essence les mélanges essence-éthanol renferment 5 à 95 % de bioéthanol selon les pays.

Il serait souhaitable de compléter le présent travail par une optimisation des différents paramètres liés à l'hydrolyse de l'amidon de pomme de terre et à la fermentation alcoolique. Aussi, une analyse par GCMS donnant la composition exacte de l'hydrolysate et du distillat de l'amidon de pomme de terre aurait pu donner plus d'informations sur le déroulement de la fermentation.

En fin, il serait intéressant d'étudier la possibilité de valoriser le résidu de la fermentation et confirmer son utilisation comme engrais chimique ou pour l'alimentation animale.

À la lumière de ces résultats, plusieurs recommandations peuvent être développées :

- Mener d'autres études afin d'optimiser les paramètres de production du bioéthanol à partir des déchets de pomme de terre issus de différentes sources (ménagère, agricole et industrielle) ;

- Faire une étude technico-commerciale afin d'évaluer les couts de la production ;
- Mettre en application industrielle la production du bioéthanol afin de permettre à l'Algérie de sortir de la dépendance des énergies fossiles.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

---

## Références bibliographiques

1. **ISO/IEC 13273-2:2015(E)**. Energy efficiency and renewable energy sources — Common international terminology — Part 2: Renewable energy sources.
2. **E1758 – 01 (2015)**. Standard Test Method for Determination of Carbohydrates in Biomass by High Performance Liquid Chromatography. ASTM International.
1. **A. Boulal, Z. Benbrahim, B. Benali et S. Ladjel**. Étude 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. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 16 N°3 (2013) 539 – 550.
2. **Abdul Aala Najmus Saqib, Philip John Whitney**. Differential behaviour of the dinitrosalicylic acid (DNS) reagent towards mono- and di-saccharide sugars. *BIOMASS AND BIOENERGY* 35 (2011) 4748-4750.
3. **AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE**. Manuel sur les Statistiques de l'énergie. 2005. Disponible sur le site de l'AIE :
4. **Amory B. LOVINS**, *Stratégies énergétiques planétaires*, édition Christian Bourgeois, Paris, 1975, page 97.
5. **AND**. Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans les zones nord, semi-aride et aride d'Algérie – 2014. Disponible sur le site de l'AND : <https://and.dz/>
6. **Armelle GARCIA**. Contribution à l'étude du fractionnement chimique de l'amidon de pomme de terre, caractéristiques physico-chimiques de ses constituants. Thèse de doctorat. L'université des sciences techniques de Lille. 1981.
7. **Bai, F., Anderson, W., Moo-Young, M.**, 2008. Ethanol fermentation technologies from sugar and starch feedstocks. *Biotechnol. Adv.* 26(1), 89-105.
8. **BENABDALLAH Fatima Zohra et BENDAOU Malika**. Contribution à la production d'éthanol à partir des épiluchures de pomme de terre. Mémoire de Master. Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen. 2016.
9. **Bertrand Tatsinkou Fossi, Céline Jiwoua, Frédéric Tavea, Léopold Tatsadjieu Ngoune, Robert Ndjouenkeu**. Production directe d'éthanol à partir de l'amidon par co-culture de deux souches de levures *Schwanniomyces sp* et *Saccharomyces cerevisiae* : application à la bioconversion de l'amidon de manioc et de maïs. *Syllabus Review* 1 (2009): 28 – 35.
10. **Bothast, R., Schlicher, M.**, 2005. Biotechnological processes for conversion of corn into ethanol. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 67(1), 19-25.
11. **Boudries Nadia (2017)**. Caractérisation des amidons de sorgho et de mil perlé cultivés dans le Sahara algérien. Thèse de doctorat. Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech, 225 p., 44 tabl., 113 fig.

12. **Brahim DJEMACI & Malika AHMED ZAÏD-CHERTOUK.** La gestion intégrée des déchets solides en Algérie. Contraintes et limites de sa mise en œuvre. CIRIEC N° 2011/04. ISSN 2070-8289.
13. **Carriquiry, M.A., Du, X., Timilsina, G.R., 2011.** Second generation biofuels: Economics and policies. *Energy Policy*. 39(7), 4222-4234.
14. **Charmley, E.; Nelson, D.; Zvomuya, F.** Nutrient cycling in the vegetable processing industry: Utilization of potato by-products. *Can. J. Soil Sci.* **2006**, 86, 621–629.
15. **Cot, M., 2006.** Études physiologiques de l'adaptation et de la résistance de la levure *S. cerevisiae* au cours de la production intensive d'éthanol. Thèse de doctorat. (INP Toulouse). Option Microbiologie et Biocatalyse industrielles. P 265.
16. **D. Arapoglou, Th. Varzakas, A. Vlyssides, C. Israilides.** Ethanol production from potato peel waste (PPW). *Waste Management* 30 (2010) 1898–1902.
17. **D. Ghobrini, K. Aïboud, L. Kebbab, L. Koumad et S. Yakoub-Bougdal.** Production de bioéthanol à partir de rebuts de dattes par fermentation en milieu soli. *Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa* (2012) 109 – 114.
18. **Demeyer A., Jacob F., Jay M., Menguy G., Perrier J.** La conversion bioénergétique du rayonnement solaire et les biotechnologies. Edition Technique & Documentation, Paris, pp.187-212 (1982).
19. **Devarapalli M., Atiyeh H.K.** A review of conversion processes for bioethanol production with a focus on syngas fermentation. *Biofuel Research Journal* 7 (2015) 268-280. DOI: 10.18331/BRJ2015.2.3.
20. **DUPRAT F., GALLANT D., GUILBOT A., MERCIER C. et ROBIN J.P., 1980.** L'amidon Dans Les Polymères Végétaux. 176-231. ed. Gauthier-Villars, Paris.
21. **Fadel, M.** Alcohol Production From Potato Industry Starchy Waste. *Egypt. J. Microbiol.* 2000, 35, 273–287.
22. **Fangzhong Wang, Yi Jiang, Wei Guo, Kangle Niu, Ruiqing Zhang, Shaoli Hou, Mingyu Wang, Yong Yi, Changxiong Zhu, Chunjiang Jia and Xu Fang.** An environmentally friendly and productive process for bioethanol production from potato waste. *Biotechnol Biofuels* (2016) 9:50.
23. **G.L. Miller.** Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugars, *Anal. Chem.*, 1959, 31 (3), pp 426–428.
24. **Gassara, F.; Brar, S.K.; Tyagi, R.D.; Verma, M.; Surampalli, R.Y.** Screening of agro-industrial wastes to produce ligninolytic enzymes by *Phanerochaete chrysosporium*. *Biochem. Eng. J.* **2010**, 49, 388–394
25. **Grisales Palacio V.H.** Modélisation et commande floues de type Takagi-Sugeno appliquées à un bioprocédé de traitement des eaux usées. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, (2007).
26. **Guetni-Larras Lilia.** Production de bioéthanol à partir de dattes de faible valeur marchande. Mémoire de Master. Université Saâd Dahlab Blida 1. 2013.

27. **Gulten Izmirliglu and Ali Demirci.** Enhanced Bio-Ethanol Production from Industrial Potato Waste by Statistical Medium Optimization. *Int. J. Mol. Sci.* 2015, 16, 24490-24505; doi:10.3390/ijms161024490.
28. **Hamelinck, C.N., Hooijdonk, G.v., Faaij, A.P., 2005.** Ethanol from lignocellulosic biomass: Techno-economic performance in short-, middle-and long-term. *Biomass Bioenergy.* 28(4), 384-410.  
[https://www.iea.org/publications/freepublications/.../statistics\\_manual\\_french.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/.../statistics_manual_french.pdf)
29. **Hyun-Jung Chung , Xiu-Qing Li , Danusha Kalinga , Seung-Taik Lim, Rickey Yada , Qiang Liu.** Physicochemical properties of dry matter and isolated starch from potatoes grown in different locations in Canada. *Food Research International* 57 (2014) 89–94.
30. **Hyun-Jung Chung, Xiu-Qing Li, Danusha Kalinga, Seung-Taik Lim, Rickey Yada, Qiang Liu.** Physicochemical properties of dry matter and isolated starch from potatoes grown in different locations in Canada. *Food Research International* 57 (2014) 89–94.
31. **Isabelle Diddenen, Jacqueline Destain, Philippe Thonart,** Le bioéthanol de seconde génération, laproduction d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique, 2008, Les presses agronomiques de Gembloux, p.11.
32. **J.-C. Ogier, D. Ballerini, J.-P. Leygue, L. Rigal et J. Pourquié.** Production d'éthanol à partir de biomasse lignocellulosique. *Revue de l'IFP*, Vol. 54 (1999), No. 1, pp. 67-94.
33. **Jean-Michel B.,** 2004, Gestion des déchets. 3éd. DUNOD, Paris, p. 448.
34. **M. Dubois, K.A. Gilles, J.K. Hamilton, P.A. Rebers et F. Smith.** Colorimetric method for determination of sugars and related substances . *Analytical Chemistry.* 28 (1956) 350-356.
35. **M. Huberson AKIN.** Évolution du pH pendant la fermentation alcoolique de moûts de raisins : modélisation et interprétation métabolique. Thèse présentée pour obtenir le titre de docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse. 2008.
36. **M. Vitolo.** "Production of ethanol and invertase by *S. cerevisiae* grown in blackstrapmolasses," in *Proceedings of the 7th Biomass for Energy and the Environment*, pp. 1477–1481, Pergamon Press, Copenhagen, Denmark, 1996.
37. **M.R. Swain, S. Kar, A.K. Sahoo, R.C. Ray.** Ethanol fermentation of mahula (*Madhuca latifolia* L.) flowers using free and immobilized yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Microbiological Research* 162 (2007) 93—98.
38. **Magdy M. Afifi, Abd El-Ghany T.M., Mohamed, A. Al Abboud, Taher M. Taha, Khaled E. Ghaleb.** Biorefinery of Industrial Potato Wastes to ethanol by Solid State Fermentation. *Res. J. Agric. & Biol. Sci.*, 7(1): 126-134, 2011.
39. **Mamatha Devarapalli, Hasan K. Atiyeh.** A review of conversion processes for bioethanol production with a focus on syngas fermentation. *Biofuel Research Journal* 7 (2015) 268-280.
40. **Manyri L.** Analyse automatique d'images de populations microbiennes. Thèse de Doctorat, Institut National des sciences Appliquées de Toulouse, France, (2005).

41. **Marija B. Tasić, Budimir V. Konstantinović, Miodrag L. Lazić, Vlada B. Veljković.** The acid hydrolysis of potato tuber mash in bioethanol production. *Biochemical Engineering Journal* 43 (2009) 208-211.
42. **Mohamed Hashem, Soumia M.I. Darwish.** Production of bioethanol and associated by-products from potato starch residue stream by *Saccharomyces cerevisiae*. *BIOMASS AND BIOENERGY* 34 (2010) 953-959.
43. **MOHAMED M. ABOUZIED AND C. ADINARAYANA REDDY.** Direct Fermentation of Potato Starch to Ethanol by Cocultures of *Aspergillus niger* and *Saccharomyces cerevisiae*. *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*, Nov. 1986, p. 1055-1059.
44. **Nigam, P., Singh, D.,** 1995. Enzyme and microbial systems involved in starch processing. *Enzyme Microb. Technol.* 17(9), 770-778.
45. **Pandey, A.,** 2010. Handbook of plant-based biofuels. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 312.
46. **Pérez, S., & Bertoft, E.** (2010). The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: a comprehensive review. *Starch/Staerke*, 62(8), 389-420.
47. **Piotr Tomasik.** Specific Physical and chemical properties of potato starch. *Food 3* (Special issue 1), 45-56. 2009 Global Science Books.
48. **Queinnec I.** Contribution à la commande de procédés biotechnologiques : application au traitement biologique de la pollution. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, (2000).
49. **Rathmann, R., Szklo, A., Schaeffer, R.,** 2010. Land use competition for production of food and liquid biofuels: An analysis of the arguments in the current debate. *Renew. Energy*. 35(1), 14-22.
50. **Rausch, K., Belyea, R.,** 2006. The future of coproducts from corn processing. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 128(1), 47-86.
51. **Rodríguez, L.F., Li, C., Khanna, M., Spaulding, A.D., Lin, T., Eckhoff, S.R.,** 2010. An engineering and economic evaluation of quick germ–quick fiber process for dry-grind ethanol facilities: Analysis. *Bioresour. Technol.* 101(14), 5282-5289.
52. **Rouselle P. Robert Y. et Crosnier J.C.,** 1996 «La pomme de terre» Editions INRA, Paris
53. **Salmon JM, Vincent O, Mauricio JC, Bely M, Barre P (1993).** Sugar transport inhibition and apparent loss of activity in *Saccharomyces cerevisiae* as a major factor of enological fermentations. *American Journal of Enology and Viticulture* 44(1):56-64.
54. **Seyed Amir Bahrani,** Modification des propriétés physico-chimiques de l'amidon par procédés hygrothermiques : Contribution à l'étude des transferts couples chaleur-masse. Université de La Rochelle, 2012.
55. **Sims, R., Taylor, M., Saddler, J., Mabee, W.,** 2008. From 1st-to 2nd-generation biofuel technologies: An overview of current industry and RD&D activities, *International Energy*

Agency. Paris, France, pp. 120. (Disponible sur le lien suivant : [http://environmentportal.in/files/2nd\\_Biofuel\\_Gen.pdf](http://environmentportal.in/files/2nd_Biofuel_Gen.pdf))

56. **Siti Hajar Mohd Azhar, Rahmath Abdulla, Siti Azmah Jambo, Hartinie Marbawi, Jualang Azlan Gansau, Ainol Azifa Mohd Faik, Kenneth Francis Rodrigues.** Yeasts in sustainable bioethanol production: A review. *Biochemistry and Biophysics Reports* 10 (2017) 52–61.
57. **Sonia Patricia Lizarazo H., Germán Gonzalo Hurtado R., and Luis Felipe Rodríguez C.** Physicochemical and morphological characterization of potato starch (*Solanum tuberosum* L.) as raw material for the purpose of obtaining bioethanol. *Agronomía Colombiana* 33(2), 244-252, 2015.
58. **Svetlana Ladanai, Johan Vinterbäck.** Global Potential of Sustainable Biomass for Energy. SLU, Institutionen för energi och teknik, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Energy and Technology, Report 013, ISSN 1654-9406, Uppsala 2009. Disponible sur : [http://www.worldbioenergy.org/uploads/WBA\\_Global%20Potential.pdf](http://www.worldbioenergy.org/uploads/WBA_Global%20Potential.pdf)
59. **Sylvia Carolina ALCÁZAR-ALAY, Maria Angela Almeida MEIRELES.** Physicochemical properties, modifications and applications of starches from different botanical sources. *Food Sci. Technol, Campinas*, 35(2): 215-236, Abr.-Jun. 2015.
60. **Yan Lin, Wei Zhang, Chunjie Li, Kei Sakakibara, Shuzo Tanaka, Hainan Kong.** Factors affecting ethanol fermentation using *Saccharomyces cerevisiae* BY4742. *BIOMASS AND BIOENERGY* XXX (2012) 1-7.

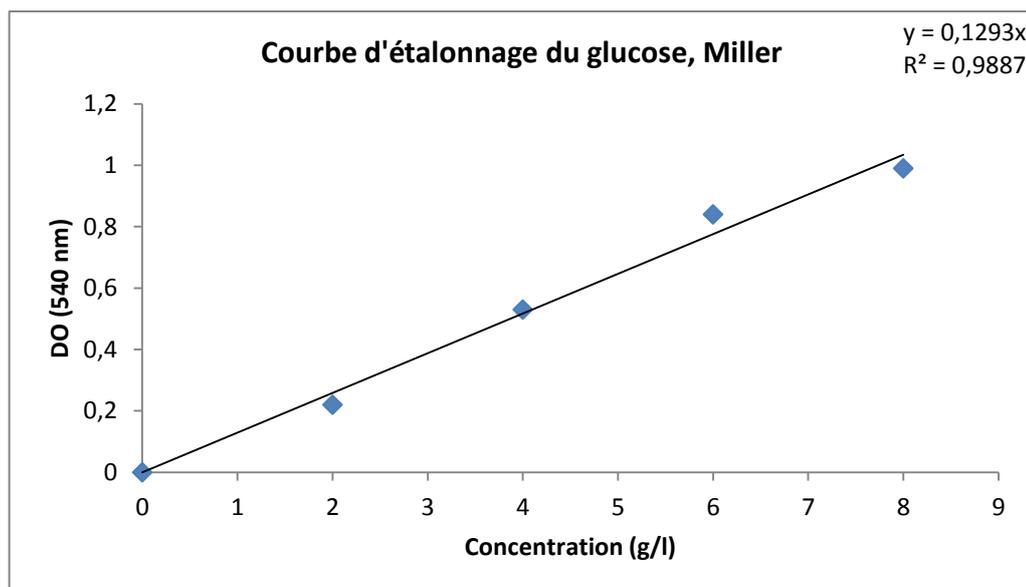
## **ANNEXES**

---

## 7. ANNEXES

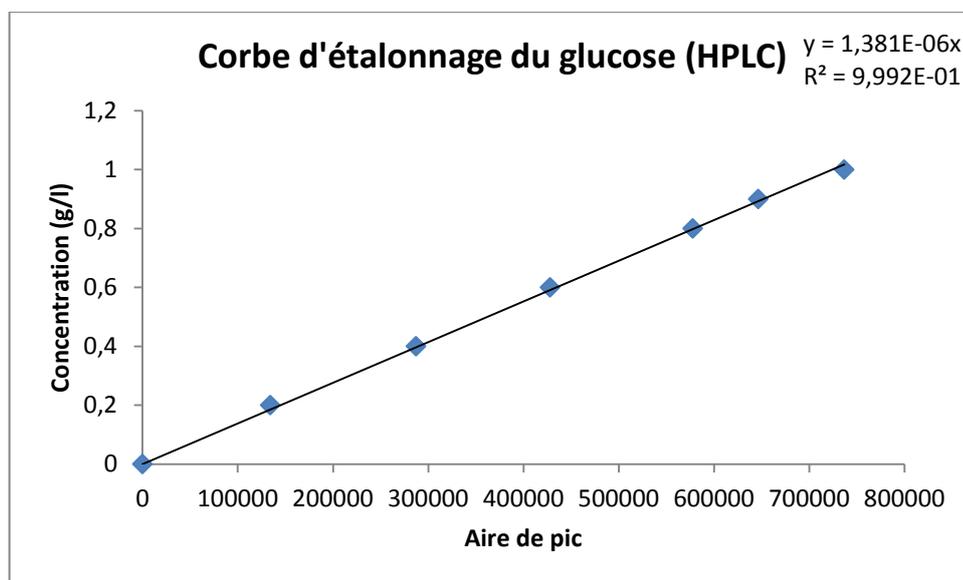
## Annexe 1 : Courbe d'étalonnage du glucose par DNS, méthode de Miller (1956)

Concentration des sucres réducteurs (g/l)	0	2	4	6	8
DO (à 540 nm)	-	0,22	0,53	0,84	0,99



**Annexe 2 : Courbe d'étalonnage du glucose (HPLC)**

Aire de pic	0	134206	287231	427985	577798	646615	736830
Concentration (g/L)	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1



**Annexe 3 : Courbe d'étalonnage de l'éthanol (HPLC)**

Aire de pic	0	1342019	2561692	5477496	11015958	21820673
Concentration (g/L)	0	4,68	9,31	18,73	37,47	75

