

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Republique Algerienne Democratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة تلمسان – أبي بكر بلقايد –  
Université de Tlemcen – Aboubakr Belkaïd –  
كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie  
قسم الهندسة الصناعية  
Département de Génie Industriel



**Memoire de Projet de fin d'Etudes**  
Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master**  
**En : Génie industriel**  
**Spécialité : Chaîne logistique**

---

# **Conception et optimisation de la chaîne logistique des bioraffineries**

---

**Présenté Par : AID Bilal**

soutenu le 09/10/2025 devant le jury composé de :

President : Mme TRIQUI Lamia Prof , Université de Tlemcen.

Encadrant : M BELKAID Fayçal Prof, Université de Tlemcen.

Examineur : Mme GAOUAR Nihad M.C.B, Université de Tlemcen.

Examineur : Mme KEDDARI Nassima M.C.B, Université de Tlemcen

Co-ncadrant : M BOUFELLOUH Radhwane Dr, Université de Tlemcen.

Année universitaire 2024 / 2025



Ce mémoire s'inscrit dans le cadre du développement durable et de la valorisation énergétique des déchets issus des palmeraies. L'objectif principal est de concevoir et optimiser une chaîne logistique intégrée permettant la transformation des résidus de palmiers dattiers en biocarburants (principalement le bioéthanol et le biogaz) à travers une bioraffinerie.

Le travail consiste d'abord à analyser le potentiel biomasse disponible dans les zones de production de dattes, puis à modéliser le système logistique reliant les sites de collecte, les centres de stockage intermédiaires et la bioraffinerie. Afin de minimiser les coûts de transport et de maximiser la rentabilité du processus, une optimisation de la localisation des installations (centres de stockage et bioraffinerie) a été réalisée à l'aide de modèles de recherche opérationnelle tels que le modèle de p-médiane.

Les résultats obtenus mettent en évidence la faisabilité technico-économique du projet et montrent que la mise en place d'un réseau logistique optimisé permettrait de réduire considérablement les coûts de transport, d'améliorer l'efficacité énergétique, et de valoriser durablement les déchets agricoles. Cette étude contribue ainsi à la transition énergétique et au développement d'une économie circulaire dans les régions productrices de dattes.

## **Abstract**

This thesis is part of the framework of sustainable development and the energy recovery of waste derived from date palm groves. The main objective is to design and optimize an integrated logistics chain that enables the transformation of date palm residues into biofuels (mainly bioethanol and biogas) through a biorefinery. The work first consists of analyzing the biomass potential available in date-producing regions, then modeling the logistics system connecting collection sites, intermediate storage centers, and the biorefinery. In order to minimize transportation costs and maximize the profitability of the process, an optimization of the location of the facilities (storage centers and biorefinery) was carried out using operational research models such as the p-median model. The results highlight the techno-economic feasibility of the project and show that the implementation of an optimized logistics network would significant-

---

ly reduce transportation costs, improve energy efficiency, and sustainably valorize agricultural waste. This study thus contributes to the energy transition and the development of a circular economy in date-producing regions.

### ملخص

يهدف العمل أساسًا إلى تصميم وتحسين سلسلة لوجستية متكاملة تسمح بتحويل مخلفات نخيل التمر إلى وقود حيوي (وخاصة الإيثانول الحيوي والغاز الحيوي) عبر مصفاة حيوية. يبدأ العمل بتحليل الإمكانيات المتاحة من الكتلة الحيوية في مناطق إنتاج التمور، ثم بنمذجة النظام اللوجستي الذي يربط مواقع الجمع ومراكز التخزين الوسيطة بالمصفاة الحيوية. ولغرض تقليل تكاليف النقل وزيادة مردودية العملية، تم تحسين مواقع المنشآت (مراكز التخزين والمصفاة الحيوية) باستخدام نماذج بحوث العمليات مثل نموذج p-median. تُظهر النتائج المتحصل عليها الجدوى التقنية والاقتصادية للمشروع، كما تؤكد أن إنشاء شبكة لوجستية مُحسّنة يمكن أن يُقلل بشكل كبير من تكاليف النقل، ويُحسّن الكفاءة الطاقوية، ويُساهم في تئمين النفايات الزراعية بطريقة مستدامة.

---

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à Monsieur BELKAID Fayçal, mon encadrant, pour son accompagnement tout au long de ce travail. Sa disponibilité, ses conseils avisés, ainsi que son encadrement rigoureux et bienveillant ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements à Madame TRIQUI Lamia, enseignante en Recherche Opérationnelle, pour ses conseils précieux et la rigueur scientifique qu'elle m'a transmise tout au long de ma formation. Son expertise dans le domaine de l'optimisation a grandement enrichi ma compréhension et a été d'une aide déterminante dans la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier Madame KEDDARI Nassima, enseignante en Mathématiques Financières, pour sa disponibilité, son écoute et la clarté de ses explications. Son approche méthodique et son exigence académique ont contribué à renforcer la qualité de mon raisonnement analytique.

Mes remerciements s'adressent aussi à Madame GAOUAR Nihad, professeure de Ressources Humaines et de Planification, pour sa bienveillance et ses encouragements constants. Son sens de l'organisation et sa vision stratégique ont été pour moi une source d'inspiration dans la conduite de ce projet.

Enfin, j'exprime toute ma gratitude à l'ensemble du corps enseignant du département de Génie Industriel pour la qualité de leur enseignement, leur engagement et leur dévouement à la formation des étudiants. Chacun, à travers son savoir et ses conseils, a contribué à enrichir mes connaissances et à forger mon parcours académique.

<b>TABLE DES MATIÈRES</b>
---------------------------

<b>Résumé</b>		<b>i</b>
<b>Remerciments</b>		<b>iii</b>
<b>Introduction général</b>		<b>6</b>
<b>1</b>	<b>Chapitre 1 :Généralités sur la chaine logistique et la bio raffinerie</b>	<b>7</b>
1.1	Introduction . . . . .	7
1.2	Fondements sur la chaîne logistique . . . . .	7
1.2.1	Définition de la logistique . . . . .	7
1.2.2	Historique . . . . .	7
1.2.3	Différents types de la logistique . . . . .	8
1.2.4	Role de la logistique . . . . .	9
1.2.5	Objectifs de la logistique . . . . .	10
1.2.6	Notion sur la chaine logistique . . . . .	11
1.2.7	Structure de la chaîne logistique . . . . .	11
1.2.8	Flux de la chaîne logistique . . . . .	12
1.2.9	Processus de la chaîne logistique . . . . .	15
1.3	Spécificités logistiques dans le secteur de la bioénergie . . . . .	16
1.3.1	Entités et activités . . . . .	16
1.4	Fondements de la Bioraffinerie . . . . .	17
1.4.1	État de l’art . . . . .	19
1.4.2	Bioraffineries de troisième génération . . . . .	21
1.4.3	Bioraffineries intégrées . . . . .	22
1.4.4	Caractéristiques et fonctions clés d’une bioraffinerie . . . . .	22
1.4.5	Fonctionnement d’une bioraffinerie . . . . .	23
1.5	Différentes bioénergies . . . . .	24
1.5.1	Biogaz . . . . .	25
1.5.2	Biocarburant . . . . .	25

1.6	Biomasse . . . . .	26
1.6.1	Type de biomasse . . . . .	27
1.6.2	Biomasse lignocellulosique . . . . .	28
1.7	Approvisionnement en matières premières . . . . .	29
1.7.1	Procédés de récolte de bois . . . . .	29
1.7.2	Procédés de récupération de la biomasse résiduelle . . . . .	30
1.8	Rôle des biotechnologies dans les bio-raffineries . . . . .	30
1.9	Conclusion . . . . .	32
<b>2</b>	<b>Bioraffinerie des palmiers dattiers</b>	<b>33</b>
2.1	Introduction . . . . .	33
2.2	La palmeraie algérienne . . . . .	33
2.3	Définitions et concepts des déchets : . . . . .	34
2.4	Toiletage : . . . . .	35
2.5	Déchets des palmiers dattiers . . . . .	36
2.5.1	Tronc : . . . . .	36
2.5.2	Pétiole : . . . . .	37
2.5.3	Epines : . . . . .	38
2.5.4	Rachis : . . . . .	38
2.5.5	Fibrillum : . . . . .	38
2.5.6	Feuilles : . . . . .	39
2.5.7	Spathe : . . . . .	39
2.5.8	Grappes : . . . . .	40
2.6	Gestion des déchets du palmier dattier . . . . .	40
2.7	Différents types de déchets du palmier dattier . . . . .	41
2.8	Demande de bioéthanol, biogaz et biodiesel en algerie . . . . .	42
2.8.1	Principales entreprises pharmaceutiques en Algérie et leurs usages potentiels du bioéthanol . . . . .	42
2.8.2	Principales entreprises cosmétiques en Algérie et leurs usages potentiels du bioéthanol . . . . .	45
2.8.3	Principales entreprises en Algérie et leurs usages potentiels du biodiesel . . . . .	46
2.8.4	Principales entreprises en Algérie et leurs usages potentiels du biogaz . . . . .	47
2.9	Revue de la littérature relative à la planification de la production dans les chaînes d'approvisionnement de la bioénergie . . . . .	48
2.9.1	Problème p-median . . . . .	48
2.10	Conclusion . . . . .	55
<b>3</b>	<b>Étude des modèles de bioraffinerie : biogaz, bioéthanol et multi-produit</b>	<b>56</b>
3.1	Introduction . . . . .	56
3.2	Étude du problème d'implantation de la bioraffinerie de biogaz . . . . .	57
3.3	Étude du problème d'implantation de la bioraffinerie de bioéthanol . . . . .	62

3.4	Étude du problème d'implantation de la bioraffinerie de Multi produit (biogaz, bioethanol) . . . . .	68
3.5	Conclusion . . . . .	73

TABLE DES FIGURES

1.1	Structures typiques de la chaîne logiques . . . . .	13
1.2	Flux de la chaîne logistique . . . . .	14
1.3	Activité de la chaîne logistique . . . . .	17
1.4	Principes et produits de la bioraffinerie. . . . .	19
1.5	Illustration de quelques types et procédés de bioraffinerie de 1ère génération. . . . .	21
1.6	Étapes clés du fonctionnement d'une bioraffinerie . . . . .	23
1.7	Sources de la biomasse lignocellulosique . . . . .	29
2.1	Carte d'Algérie,« indiquant les Wilayas du Sud, Cœur de la Palmeraie Algérienne»	34
2.2	Accumulation des sous-produits du palmier dattier à l'intérieur des parcelles . . . . .	35
2.3	Photo du tronc et les rejets. . . . .	36
2.4	Photo d'une palme. . . . .	37
2.5	Photo de pétiole. . . . .	38
2.6	Photo d'une palme. . . . .	39
2.7	Implantation des points de collecte et des sites candidats dans QGIS . . . . .	50
2.8	Résultats de la formulation du modèle sous CPLEX . . . . .	52
2.9	Résultats de la formulation du modèle sous CPLEX . . . . .	52
2.10	Extraction de la matrice des distances sous Excel . . . . .	53
2.11	Résultats finaux de l'implantation obtenus sous CPLEX . . . . .	53
2.12	Localisation optimale représentée sur QGIS . . . . .	54
3.1	Intégration des points de demande et des sites candidats dans QGIS . . . . .	58
3.2	Résultats de la formulation du modèle sous CPLEX . . . . .	59
3.3	Résultats de la formulation du modèle sous CPLEX . . . . .	60
3.4	Extraction de la matrice des distances sous Excel . . . . .	60
3.5	Résultats finaux de l'implantation obtenus sous CPLEX . . . . .	61
3.6	Localisation optimale représentée sur QGIS . . . . .	61
3.7	Intégration des points de demande et des sites candidats dans QGIS . . . . .	63
3.8	Résultats de la formulation du modèle sous CPLEX . . . . .	64
3.9	Résultats de la formulation du modèle sous CPLEX . . . . .	65

3.10	Extraction de la matrice des distances sous Excel . . . . .	65
3.11	Résultats finaux de l'implantation obtenus sous CPLEX . . . . .	66
3.12	Localisation optimale représentée sur QGIS . . . . .	66
3.13	Intégration des points de demande et des sites candidats dans QGIS . . . . .	69
3.14	Résultats de la formulation du modèle sous CPLEX . . . . .	70
3.15	Résultats de la formulation du modèle sous CPLEX . . . . .	71
3.16	Extraction de la matrice des distances sous Excel . . . . .	71
3.17	Résultats finaux de l'implantation obtenus sous CPLEX . . . . .	72
3.18	Localisation optimale représentée sur QGIS . . . . .	72

LISTE DES TABLEAUX
--------------------

1.1	Différentes générations de biocarburants et les procédés de transformation pour chaque génération . . . . .	26
1.2	Classification des types de biomasse et leurs procédés de transformation . . . . .	27
2.1	Valorisation des différents types de déchets du palmier dattier en bioraffinerie . . . . .	41
2.2	Identification des entreprises Pharmaceutique industrielles à potentiel d'intégration du bioéthanol dans leurs procédés en Algérie . . . . .	44
2.3	Identification des entreprises cosmétiques industrielles à potentiel d'intégration du bioéthanol dans leurs procédés en Algérie . . . . .	45
2.4	Identification des entreprises industrielles à potentiel d'intégration du bio-diesel dans leurs procédés en Algérie . . . . .	46
2.5	Entreprises en Algérie présentant un besoin potentiel en biogaz comme source d'énergie directe . . . . .	47
2.6	Points de collecte de matières premières et sites candidats pour l'implantation d'un centre de collecte . . . . .	49
3.1	Points de consommation de biogaz et sites candidats pour l'implantation d'une bioraffinerie . . . . .	57
3.2	Points de consommation de bioéthanol et sites candidats pour l'implantation d'une bioraffinerie . . . . .	62
3.3	Points de consommation de biogaz et sites candidats pour l'implantation d'une bioraffinerie . . . . .	68

# INTRODUCTION GÉNÉRAL

La gestion de la chaîne d’approvisionnement joue un rôle essentiel dans l’assurance de la compétitivité des coûts au sein de cette dernière. Toutefois, certaines spécificités propres aux produits transitant dans la chaîne complexifient la tâche de planification. Cela souligne la nécessité de recourir à des modèles d’aide à la décision capables de traiter des problématiques complexes et de renforcer la qualité du processus décisionnel.

La planification de la chaîne d’approvisionnement peut s’effectuer à trois niveaux distincts : stratégique, tactique et opérationnel. Au niveau stratégique, l’objectif est de déterminer le nombre optimal, la localisation géographique ainsi que la capacité des sites de production et des entrepôts. Cette planification s’étend généralement sur un horizon de long terme, souvent supérieur à un an. En revanche, les niveaux tactique et opérationnel se concentrent sur une gestion efficace des ressources et sur l’optimisation du flux de matières à travers la chaîne logistique. Dans ce cas, l’horizon temporel est plus court et peut varier selon les besoins : il peut être saisonnier, mensuel, voire quotidien (Awudu et Zhang, 2012 ; De Meyer et al., 2014 ; Yue et al., 2014).

Dans le cadre de cette étude, l’objectif principal est d’assurer la gestion optimale d’une chaîne d’approvisionnement dédiée à la bioénergie à l’aide de la recherche opérationnelle (RO). Plus précisément, la conception et la planification de cette chaîne, allant de la biomasse jusqu’à la production de bioénergie, nécessitent un ensemble important de prises de décisions. Ces décisions concernent l’ensemble des opérations intervenant tout au long de la chaîne, notamment la culture et la récolte de la biomasse, son transport, sa transformation en bioénergie ou en biocarburant, la logistique des biocarburants, ainsi que la transmission de l’énergie et sa distribution vers les marchés finaux.

Ce processus de conception, d’implémentation et de gestion constitue un système complexe à multiples dimensions. L’ensemble des activités impliquées dans la chaîne biomasse–bioénergie doivent être organisées de manière cohérente et structurée afin d’assurer l’efficacité des flux physiques, informationnels et financiers au sein des réseaux logistiques (Eksioglu et al., 2015). Une planification rigoureuse et une gestion efficace de la bioraffinerie contribuent

significativement à la réduction des coûts de production, renforçant ainsi la compétitivité de la biomasse en tant que ressource énergétique. À cet égard, la recherche opérationnelle et la modélisation mathématique représentent des outils essentiels pour atteindre ces objectifs.

## CHAPITRE 1

# CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LA CHAÎNE LOGISTIQUE ET LA BIO RAFFINERIE

## 1.1 Introduction

À l'origine, la logistique est un concept issu du domaine militaire, englobant l'ensemble des ressources physiques nécessaires à la mise en œuvre des stratégies et des tactiques, notamment le transport, le stockage, la production et les achats.

Par la suite, les entreprises ont transposé ces principes au secteur industriel, élargissant ainsi la définition de la logistique à l'étude globale des défis liés à la gestion des flux de matières et de produits, depuis les fournisseurs jusqu'aux clients [1].

## 1.2 Fondements sur la chaîne logistique

### 1.2.1 Définition de la logistique

La logistique est l'ensemble des activités et des processus visant à assurer la gestion efficace des flux de biens, de services et d'informations, depuis leur source d'approvisionnement jusqu'au point de consommation. Elle inclut la planification, l'organisation et le contrôle du transport, du stockage et de la distribution, en optimisant les quantités, les délais et les coûts afin de répondre aux besoins des clients de manière efficiente.

### 1.2.2 Historique

Selon le dictionnaire de l'Académie française, le mot «logistique» désigne d'abord la science du calcul. Étymologiquement, il dérive du grec *logistikos*, qui signifie «relatif à l'art du raisonnement». Platon fut l'un des premiers à employer ce terme pour distinguer le calcul pratique (logistique) de l'arithmétique théorique. Aujourd'hui encore, cette conception perdure, notamment dans le domaine académique et en entreprise, où la logistique se concentre sur

l'optimisation des processus, tels que l'organisation des tournées, le chargement des palettes ou encore la réduction des coûts.

Le terme «logistique» trouve également son origine dans le domaine militaire, où il désignait initialement le grade d'un officier chargé du «logis» des troupes en temps de combat. Sous Napoléon Ier, un système structuré d'approvisionnement en vivres et en munitions fut mis en place, et le titre de «major général des logis» fut attribué à un officier responsable de l'hébergement, du déplacement et du positionnement des troupes sur le terrain (Jomini, 1837). Le logisticien militaire avait alors pour mission principale d'assurer le transport, le ravitaillement et le campement des forces armées.

Le terme «logistique» s'est popularisé dans le langage courant au début des années 1990, notamment avec la guerre du Golfe, où l'on parlait de «soutien logistique» dans le cadre d'opérations militaires et humanitaires. L'une des plus grandes opérations logistiques militaires du XXe siècle fut le débarquement allié en Normandie en juin 1944, dont l'organisation a constitué un modèle de coordination stratégique. L'expertise développée dans ce contexte s'est progressivement diffusée au sein des entreprises, d'abord aux États-Unis, puis en Europe, où la logistique s'est imposée comme une fonction essentielle, influencée par les évolutions économiques et industrielles.

[2].

### 1.2.3 Différents types de la logistique

On distingue plusieurs types de logistique en fonction de leur objet et de leurs méthodes, chacun répondant à des besoins spécifiques et s'adaptant aux contraintes propres à chaque secteur d'activité :

**1- Logistique d'approvisionnement :** Assure l'acheminement des matières premières, composants et sous-ensembles nécessaires à la production vers les usines.

**2- Logistique d'approvisionnement général :** S'adresse aux entreprises de services et aux administrations pour leur fournir les équipements et fournitures nécessaires à leur activité (exemple : fournitures de bureau).

**3- Logistique de production :** Gère l'approvisionnement des lignes de production en matériaux et composants tout en planifiant la production. Cette logistique tend à intégrer la gestion de production dans son ensemble.

**4- Logistique de distribution :** Organise l'acheminement des produits vers le consommateur final, que ce soit via les grandes surfaces ou par livraison directe.

**5- Logistique militaire :** Permet le transport des forces et du matériel nécessaire à leur déploiement et leur soutien sur le terrain.

**6- Logistique de soutien :** Initialement développée dans le secteur militaire, elle s'étend aux domaines de l'aéronautique, de l'énergie et de l'industrie pour assurer la maintenance et l'opérationnalité des systèmes complexes.

**7- Service après-vente (SAV) :** Proche de la logistique de soutien, mais exercée dans un cadre marchand. Cette activité, souvent appelée « management de services », peut être assurée par des entreprises spécialisées en maintenance tierce (Third Party Maintenance).

**8- Reverse logistics (logistique inversée) :** Désigne la gestion des retours de produits pour réparation, recyclage ou élimination des déchets industriels (exemples : épaves de voitures, cartouches d'imprimantes).

### 1.2.4 Role de la logistique

La fonction de la logistique dans l'entreprise consiste à assurer, au moindre coût, la coordination de l'offre et de la demande, tant sur le plan stratégique que tactique, tout en garantissant le maintien à long terme de la qualité des relations fournisseur-client. Ses principaux objectifs sont les suivants : [3]

**1- Gestion économique de la production :** Cela passe par l'élimination des ruptures de stocks coûteuses, en maintenant une information continue sur l'état du marché

**2- Réduction des stocks :** Réduction des stocks : Cela est possible grâce à une rotation accélérée des marchandises entreposées, permettant ainsi une réponse plus rapide à une demande souvent très volatile.

**3- Disponibilité des produits :** Disponibilité des produits : Assurer que les produits soient livrés au client final dans les délais les plus courts possibles et au meilleur coût de distribution.

**4- Amélioration de la qualité :** Veiller à la qualité de la chaîne qui relie le producteur au consommateur, afin d'atteindre un « zéro défaut » dans la prestation de service.

### 1.2.5 Objectifs de la logistique

On peut citer plusieurs objectifs de la logistique : [4]

**1- Satisfaire la demande de flux physiques :** Cela inclut la gestion des matières, du transport, de l'emballage et des stocks, en coordination avec le responsable de l'urbanisation des systèmes d'information et des flux d'informations associés, notamment en matière de traçabilité.

**2- Co-responsabilité dans la gestion de la chaîne logistique :** Elle inclut la gestion des moyens nécessaires pour atteindre cet objectif, tels que les matériels et les machines.

**3- Garantir la qualité des flux physiques :** La logistique est co-responsable, en collaboration avec tous les services, de la qualité des flux physiques.

**4- Mobiliser les ressources nécessaires :** En collaboration avec les autres services, il s'agit de mobiliser les ressources humaines et financières pour atteindre les objectifs logistiques.

**5- Réaliser la production initiée par le service marketing/vente :** La logistique se place ainsi au cœur des négociations des processus métiers, visant à assurer la production des biens en adéquation avec les besoins du marché.

**6- Gestion directe des flux de matières :** Approvisionnement, stock, distribution, ainsi que gestion indirecte des flux immatériels, tels que les flux d'informations (suivi des commandes, gestion des données) et les flux financiers (facturation, paiements, gestion des coûts de transport et de stockage).

### 1.2.6 Notion sur la chaîne logistique

La chaîne logistique est un domaine d'étude clé, ayant donné lieu à une littérature très riche, bien que le terme ne dispose pas d'une définition universelle. Voici plusieurs définitions proposées par différents experts :

**Définition 1 [5] :** La chaîne logistique englobe tous les acteurs impliqués dans la production et la livraison d'un produit fini ou d'un service, depuis le fournisseur du fournisseur jusqu'au client du client. Elle inclut les fournisseurs, les fabricants, les distributeurs et les clients.

**Définition 2 [6] :** La chaîne logistique est un réseau d'entités autonomes ou semi-autonomes, collectivement responsables de l'acquisition, de la production et de la distribution de produits appartenant à une ou plusieurs familles.

**Définition 3 [7] :** La chaîne logistique pour un produit donné est définie comme un système de sous-traitants, de producteurs, de distributeurs, de détaillants et de clients, entre lesquels s'échangent les flux matériels dans le sens des fournisseurs vers les clients et les flux d'information dans les deux sens.

D'autres chercheurs se concentrent sur la chaîne logistique au niveau de l'entreprise. Pour eux, la chaîne logistique est un réseau d'organisations ou de fonctions géographiquement dispersées sur plusieurs sites, qui coopèrent afin de réduire les coûts et d'augmenter la vitesse des processus et activités entre les fournisseurs et les clients. Bien que l'objectif de satisfaction du client reste le même, la complexité varie d'une chaîne logistique à l'autre [8] [9] [10].

**Définition 4 [11] :** Selon cette définition, la chaîne logistique est un réseau de ressources qui acquièrent des matières premières, les transforment en produits intermédiaires, puis en produits finis, et livrent ces produits aux clients à travers un système de distribution.

### 1.2.7 Structure de la chaîne logistique

Il est essentiel d'identifier une structure permettant de caractériser les entités interagissant pour former une chaîne logistique. Cependant, en raison de la grande variété des types de fabrication et des périmètres des chaînes, il est difficile de couvrir l'ensemble des cas réels des structures des chaînes logistiques dans la littérature scientifique. Néanmoins, plusieurs typologies usuelles permettent de modéliser ces structures. Parmi elles, on distingue généralement les catégories suivantes : [12]

**1- Structure série :** Cette structure représente un processus de fabrication linéaire et vertical. Elle est utilisée pour étudier l'influence de la propagation de l'information sur l'ensemble de la chaîne logistique.

**2- Structure dyadique :** Il s'agit d'un cas particulier d'une chaîne logistique en série, limitée à deux niveaux. Elle sert principalement à étudier les relations entre client et fournisseur,

ou entre donneur d'ordre et sous-traitant.

**3- Structure divergente :** Elle permet de modéliser un réseau de distribution où la matière part d'un point unique et se distribue à travers la chaîne.

**4- Structure convergente :** Elle modélise un processus d'assemblage. Dans une chaîne convergente, les matières premières circulent entre différents sites avant de converger vers un site unique, qui est généralement le lieu d'assemblage final du produit.

**5- Structure réseau :** Il s'agit d'une combinaison des structures convergente et divergente. Cette structure permet de prendre en compte à la fois les aspects d'approvisionnement et de distribution. Elle peut devenir plus complexe en fonction du nombre d'acteurs impliqués, notamment pour des produits complexes. Une structure purement convergente exclut les réseaux de distribution pour la vente des produits, tandis qu'une structure purement divergente est peu probable, car cela signifierait que le produit fini découle uniquement d'un fournisseur amont.

En règle générale, la typologie d'une chaîne logistique est de type réseau, avec des ramifications plus ou moins grandes. Certaines chaînes logistiques peuvent être très étendues, notamment pour des produits complexes. Une entreprise peut ainsi être en relation avec plusieurs fournisseurs. Pour les grands réseaux, les acteurs de la chaîne sont classés en deux catégories :

**1- Membres essentiels :** Ce sont les acteurs industriels majeurs contribuant à l'élaboration du produit.

**2- Membres secondaires :** Ce groupe inclut des consultants, des banques, des partenaires de recherche, etc.

Pour rechercher la performance, certains auteurs suggèrent de se concentrer uniquement sur les membres essentiels, et même de se focaliser sur certaines relations spécifiques, notamment celles avec les fournisseurs des composants critiques. Ce réseau peut donc être restreint pour l'optimisation.

### 1.2.8 Flux de la chaîne logistique

Nous distinguons trois types de flux traversant une chaîne logistique : les flux d'information, les flux physiques et les flux financiers. Ces flux peuvent être régis par des règles définies dans les contrats de partenariat. Ces contrats déterminent les relations entre les entreprises de la chaîne logistique, en prévoyant des pénalités en cas de retard de livraison d'un fournisseur ou de rupture de stock, et en définissant qui gère le transport et les stocks entre les différents maillons de la chaîne. [14]

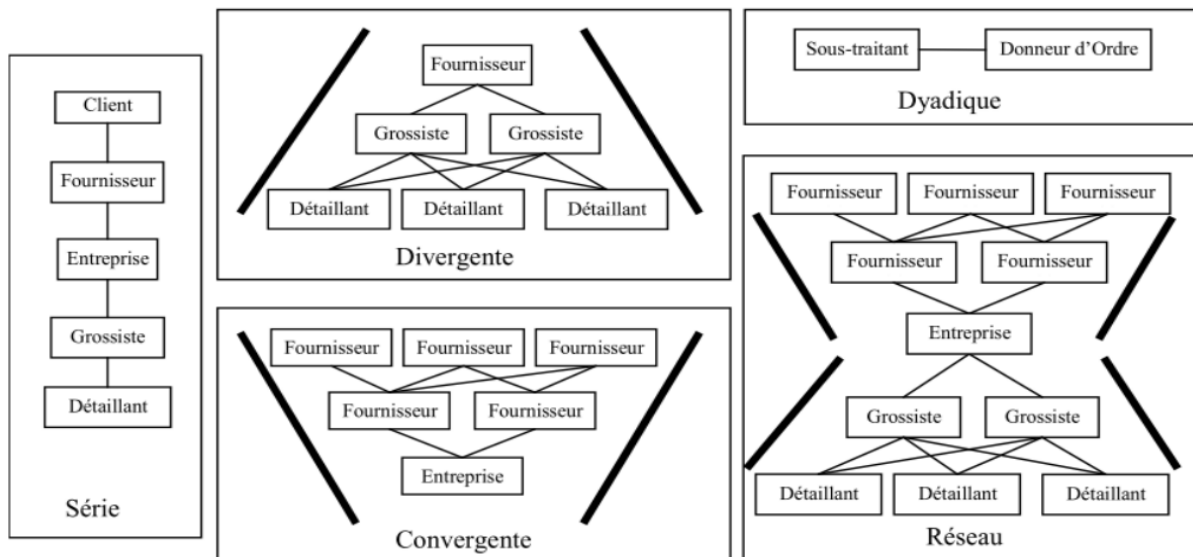


Fig. 1.1: Structures typiques de la chaîne logiques [13]

### Flux d'information

Le flux d'information représente l'ensemble des transferts ou échanges de données entre les différents acteurs de la chaîne logistique. Ce flux inclut principalement des informations commerciales, comme les commandes passées entre clients et fournisseurs. Une commande comprend généralement la référence du produit, la quantité commandée, la date de livraison souhaitée, et le prix négocié lors de la vente. D'autres éléments peuvent être ajoutés, tels que les options désirées pour le produit, la fréquence de livraison, etc.

Les entreprises échangent également des informations techniques : paramètres physiques du produit, gammes opératoires, capacités de production et de transport, ainsi que des informations relatives aux niveaux de stock. De plus en plus, les clients exigent de connaître l'état d'avancement de la fabrication de leurs produits. Le principe de traçabilité permet un droit de regard accru du client sur le fournisseur.

Grâce aux progrès des technologies de l'information et de la communication (TIC), le flux d'information devient de plus en plus rapide. Cependant, le développement de ces flux trouve ses limites dans le besoin de confidentialité entre les acteurs de la chaîne. Un autre problème persistant est la qualité des données véhiculées, car des décisions peuvent parfois être basées sur des informations erronées ou périmées.

### Flux physiques

Les flux physiques concernent le déplacement et le stockage des marchandises. Ils commencent au site de production et vont jusqu'au client final, en passant par les entrepôts et les points de vente comme les hypermarchés. Pour une entreprise, la quantité de produits fabriqués et vendus chaque année correspond au volume de flux physiques réalisés. Les flux physiques peuvent être décomposés en :

**1- Flux principal :** produits et composants.

**2- Flux annexe :** par exemple, les emballages et étiquettes.

**3- Flux retour :** retours de produits pour réparation (service après-vente) ou pour recyclage et destruction en fin de vie du produit.

[15]

### Flux financiers

Le flux financier englobe l'ensemble des transactions monétaires liées aux activités de l'entreprise, incluant les ventes de produits, l'achat de composants et de matières premières, ainsi que l'acquisition d'outils de production, d'équipements divers et la location d'entrepôts. Il couvre également le paiement des salaires des employés. Généralement centralisée au sein du service financier ou comptable, sa gestion reste en lien étroit avec la production via les services achats et le service commercial. Sur le long terme, le flux financier concerne aussi les investissements majeurs, tels que la construction de nouveaux bâtiments et l'installation de lignes de fabrication, impliquant parfois des échanges avec des organismes bancaires externes. [16]

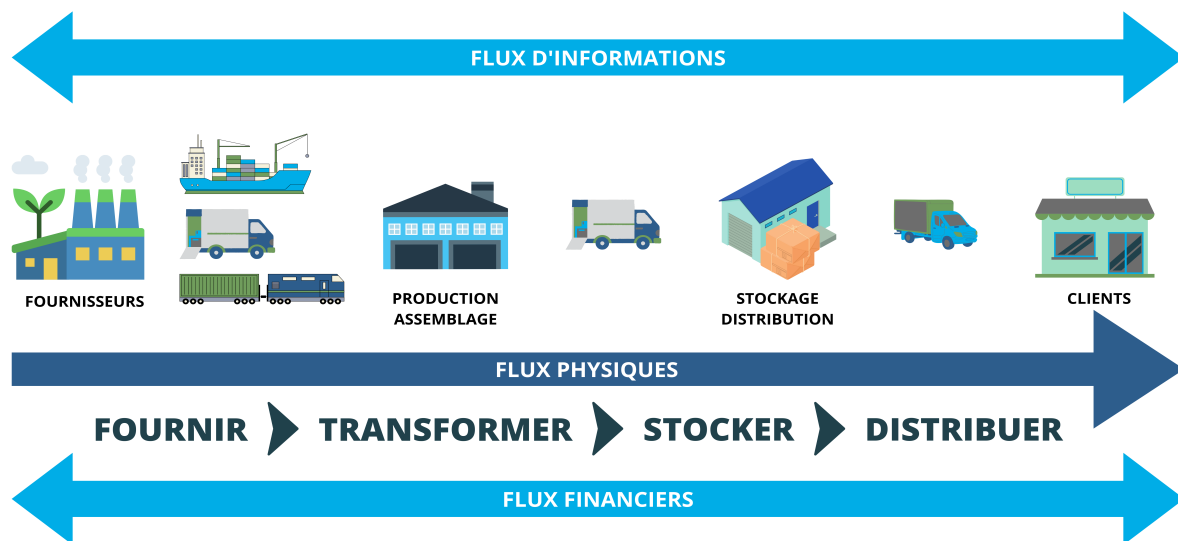


Fig. 1.2: Flux de la chaîne logistique  
[17]

### 1.2.9 Processus de la chaîne logistique

Un processus est un ensemble d'activités organisées de manière à atteindre certains objectifs de l'entreprise. Chaque processus définit des rôles et des relations, systématise l'organisation et la politique de l'entreprise. Dans le cadre de la chaîne logistique, il existe cinq processus principaux, l'approvisionnement, la production, la distribution, la vente, et la gestion des retours. [18]

#### **processus d'approvisionnement :**

Le processus d'approvisionnement se concentre sur la fourniture des composants nécessaires à la fabrication. Il se divise en deux phases principales :

**1- Sélection des fournisseurs :** L'entreprise choisit les fournisseurs qui répondront à ses besoins en matière de qualité, de coût et de délai.

**2- Passation des commandes :** L'entreprise commande les composants aux fournisseurs en fonction de la production à réaliser. Ce processus garantit que les ressources nécessaires sont disponibles en temps voulu.

#### **Processus de production :**

Le processus de production englobe toutes les étapes de transformation des composants pour créer les produits finis. L'objectif de ce processus est de fabriquer les produits requis tout en maximisant la productivité du système, notamment par un taux élevé d'utilisation des ressources. Cela inclut la gestion des flux de travail, le contrôle de la qualité et l'optimisation des coûts de production.

#### **Processus de distribution :**

Le processus de distribution vise à assurer la livraison efficace des produits finis aux clients en optimisant le réseau de distribution. Cela comprend l'organisation et le choix des moyens de transport, la détermination du nombre d'intermédiaires dans le réseau, ainsi que le positionnement et la gestion des entrepôts. L'objectif principal est de garantir une livraison rapide tout en maîtrisant les coûts de distribution.

#### **Processus de vente :**

Le processus de vente, piloté par le service commercial, vise à développer les relations avec les clients en intégrant plusieurs aspects stratégiques. Il englobe la négociation des prix et des

délais, l'enregistrement des commandes et l'amélioration de la connaissance du marché. Ce processus joue également un rôle clé dans la définition de la demande prévisionnelle et l'intégration des aspects commerciaux, tels que la durée de vie du produit, afin d'anticiper son évolution sur le marché. De plus, les activités marketing, incluant l'analyse de marché, la publicité et les promotions, y sont intégrées pour renforcer la compétitivité de l'entreprise.

### **processus de gestion des retours :**

Le processus de gestion des retours, encore relativement récent, englobe l'ensemble des activités liées au retour des produits, qu'il s'agisse de clients ou d'autres acteurs du réseau logistique. Il joue un rôle essentiel dans le traitement des produits retournés, qu'ils soient destinés à la réparation, au remplacement ou au recyclage. Plus globalement, la chaîne logistique couvre l'ensemble du cycle, depuis l'approvisionnement des premiers fournisseurs jusqu'aux clients finaux, en intégrant tous les processus nécessaires pour assurer une gestion optimale des flux de produits et d'informations.

## **1.3 Spécificités logistiques dans le secteur de la bioénergie**

En général, les systèmes de production de bioénergie sont structurés en trois segments principaux : l'amont (upstream), le centre (midstream), et l'aval (downstream). Dans chaque segment, il y a plusieurs entités. Les entités en aval concernent les processus post-conversion, tels que le stockage, le mélange et la distribution des produits finis. Le segment central, quant à lui, regroupe les installations de conversion où la biomasse est transformée en bioénergie ou en d'autres produits, à l'aide de différentes technologies de valorisation. Enfin, les entités en amont englobent l'ensemble des activités liées à l'approvisionnement en biomasse, depuis sa production jusqu'à sa livraison aux unités de conversion, pour un bon fonctionnement de cette chaîne nécessite une coopération étroite et efficace entre les différentes parties prenantes impliquées dans l'approvisionnement.

### **1.3.1 Entités et activités**

Ces entités comprennent la zone de demande, les centres de distribution, les sites de mélange, les unités de prétraitement, les technologies de conversion, les sites de stockage, les centres de collecte, les sites de biomasse. La figure 1.1 montre la structure générale et les activités des chaînes d'approvisionnement bioénergétiques.

Il commence par récolter la biomasse cultivée sur les sites de biomasse, qui est ensuite acheminée vers des sites intermédiaires ou des centres de collecte, puis vers des unités de prétraitement. Après cette étape, la biomasse est transportée vers les bioraffineries, où elle est transformée en bioénergie, biocarburants et coproduits.

Il existe trois catégories principales de technologies, thermochimiques, biochimiques et chimiques. Les produits finaux pourraient être l'énergie (électricité), la chaleur, les produits bio-

chimiques, les biocarburants (par exemple, le bioéthanol et le biodiesel). Ensuite, les produits finaux sont livrés aux centres de distribution et aux clients. Notez que certaines études proposent de regrouper certaines entités pour simplifier la modélisation ou l'implantation industrielle. Par exemple, les installations de mélange peuvent être intégrées directement au sein des bioraffineries.

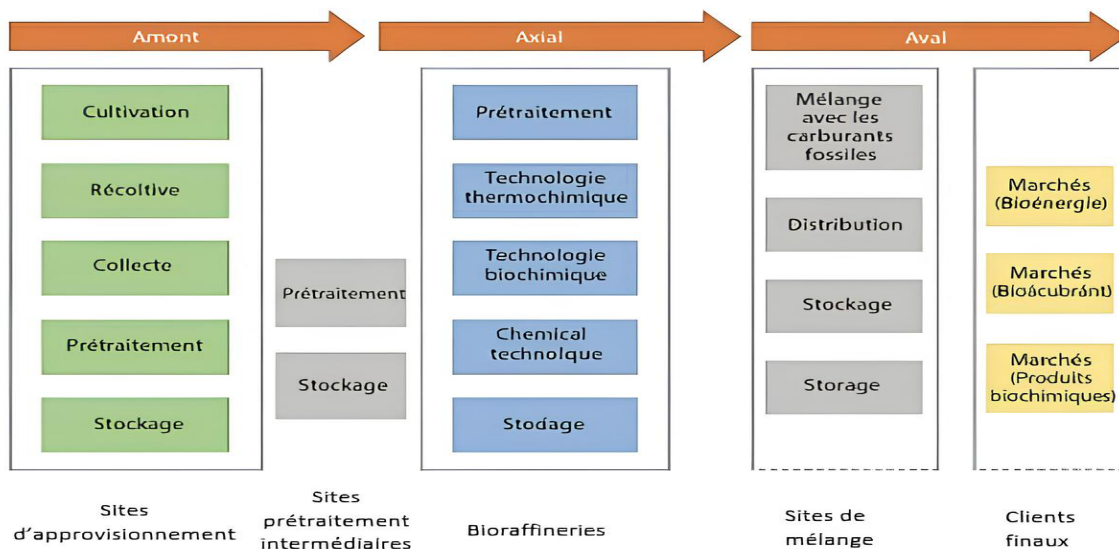


Fig. 1.3: Activité de la chaîne logistique [13]

## 1.4 Fondements de la Bioraffinerie

Le bioraffinage, bien que déjà exploré dès le début du 19e siècle, a suscité un intérêt croissant depuis les années 1970. Cette dynamique est principalement liée à l'augmentation des prix du pétrole, à la volonté accrue de certains pays d'atteindre une indépendance énergétique, ainsi qu'à l'épuisement progressif des réserves pétrolières [26] [27]. Même si le concept de bioraffinage est applicable à l'échelle mondiale, selon le Département de l'Énergie des États-Unis (DOE), il désigne un processus intégré permettant de transformer la biomasse en une vaste variété de produits à haute valeur ajoutée par le biais de procédés spécifiques [28]. Cette approche partage des similitudes avec le raffinage du pétrole, qui permet de convertir le pétrole brut en carburants et autres produits dérivés. De manière comparable, la biomasse peut être décomposée, purifiée et transformée pour produire divers produits aux applications multiples. [29]

Bien que le concept de bioraffinerie repose sur la centralisation des opérations, le bioraffinage peut impliquer plusieurs unités de transformation, parfois éloignées les unes des autres et appartenant à différentes entreprises ou acteurs industriels.

Le terme bioraffinerie désigne ainsi une installation industrielle spécialisée dans la transformation de matières premières renouvelables, telles que la biomasse, en produits à forte valeur ajoutée, notamment [30] [31] :

o **Les bioénergies** : Comme le biogaz et le biocarburant (l'éthanol et le biodiesel ).

o **Les produits chimiques** : Utilisés dans divers secteurs industriels.

o **L'énergie** : Sous forme d'électricité ou de chaleur.

o **Les matériaux** : Tels que les bioplastiques ou les fibres.

o **Les produits de nutrition** : Destinés à l'alimentation humaine et animale.

o **Les résidus agricoles et forestiers** : Tels que la sciure et les copeaux de bois, utilisés comme matières premières pour divers procédés de transformation.

Conçue pour maximiser l'utilisation des ressources biologiques tout en minimisant les déchets et l'empreinte écologique, la bioraffinerie joue un rôle clé dans le développement durable et l'économie verte.

Contrairement à la bioraffinerie, qui regroupe toutes ses opérations sur un même site, le concept de bioraffinage repose sur une approche plus décentralisée, avec plusieurs ateliers pouvant être distants et appartenant à divers acteurs industriels. Cette organisation repose sur des choix stratégiques liés aux produits, aux procédés utilisés, ainsi qu'à la taille des installations et à leur impact environnemental. La compétitivité de cette bioéconomie émergente dépend ainsi de ces caractéristiques industrielles et environnementales.

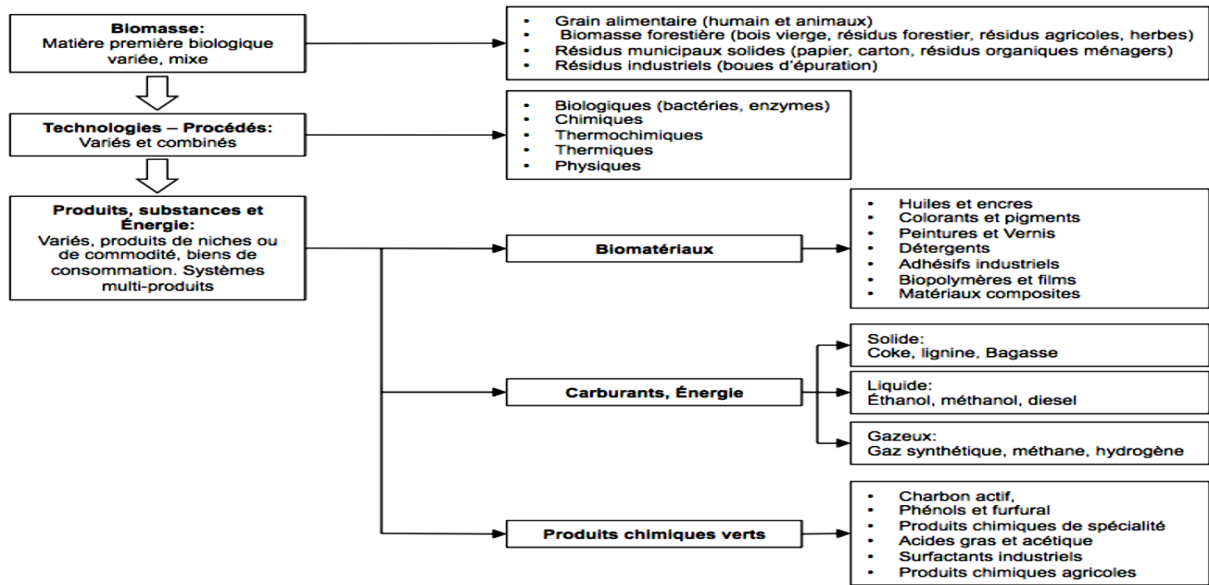


Fig. 1.4: Principes et produits de la bioraffinerie.  
[32] avec l'aimable autorisation de Springer Science et Business Media

### 1.4.1 État de l'art

À ses débuts, la bioraffinerie était principalement axée sur la production de bioéthanol, privilégiant l'utilisation de biomasses riches en amidon et en sucre, faciles à fermenter. Toutefois, avec son expansion rapide dans les années 2000, la concurrence croissante entre les matières premières destinées à l'industrie et celles utilisées pour l'alimentation a suscité des débats médiatiques [33] [34]. En 2009, on estimait que plus d'un quart de la production de maïs aux États-Unis était consacré à la fabrication d'éthanol [33].

Par ailleurs, certains chercheurs ont remis en question les avantages environnementaux des bioraffineries de première génération. En tenant compte des émissions de gaz à effet de serre (GES) générées par la conversion des terres pour compenser l'utilisation agricole à des fins industrielles, le bilan carbone de l'éthanol pourrait être plus élevé que celui de l'essence [35] [36]. De plus, d'autres études ont souligné les effets négatifs de la production de biomasse, notamment en matière d'eutrophisation [37].

Face aux limites des premières bioraffineries, la recherche s'est orientée vers l'exploitation de biomasses lignocellulosiques, qui ne concurrencent pas les ressources alimentaires et nécessitent moins de terres agricoles fertiles [38], trois types de bioraffineries sont aujourd'hui privilégiés dans les travaux de recherche et développement :

- o La bioraffinerie lignocellulosique
- o La bioraffinerie verte
- o La bioraffinerie céréalière complète (englobant à la fois le grain et la paille). Cette classification repose sur la nature des matières premières utilisées.

**1- Les bioraffineries lignocellulosiques :** désignent des installations industrielles qui transforment des ressources provenant du bois ainsi que d'autres biomasses lignocellulosiques, telles que la paille, le bambou, le Miscanthus, etc. Ces bioraffineries produisent principalement des biocarburants, des biomolécules (synthons utilisés dans la chimie fine), des lignines et leurs dérivés (notamment des biopolymères), ainsi que de l'énergie [41].

**2- Les bioraffineries vertes :** désignent des installations industrielles qui fonctionnent en suivant les cycles saisonniers pour transformer de la biomasse humide. Elles exploitent généralement des ressources telles que l'herbe, la luzerne, le trèfle, des céréales non mûres, ou des produits périssables comme les pommes de terre et les betteraves sucrières, qui nécessitent un traitement rapide, et se concentrent principalement sur la production de biocarburants [39].

**3- Les bioraffineries céréalières complète :** utilise l'intégralité d'une culture agricole incluant la paille et le grain. Ces cultures, telles que le maïs, le blé, le triticale ou le seigle, sont exploitées pour produire une large gamme de produits, allant des biocarburants, des produits chimiques, et des matériaux issus de la paille, jusqu'à des produits alimentaires et des bioproduits dérivés du grain, tels que l'amidon ou le bioéthanol. [38]. Alors que la paille représente la partie lignocellulosique de la récolte, le grain peut être utilisé comme nourriture ou l'amidon peut être extrait pour être transformé en divers produits.

### **Bioraffineries de première génération**

Le bioraffinage de première génération repose sur l'exploitation directe de biomasses agricoles conventionnelles telles que la betterave sucrière, la canne à sucre, le blé, le maïs ou encore la pomme de terre. Ces matières premières, principalement riches en sucres ou en amidon, sont utilisées pour la production de biocarburants ou d'autres produits biosourcés. Une représentation schématique de ce type de bioraffinage est illustrée à la figure suivante[103].

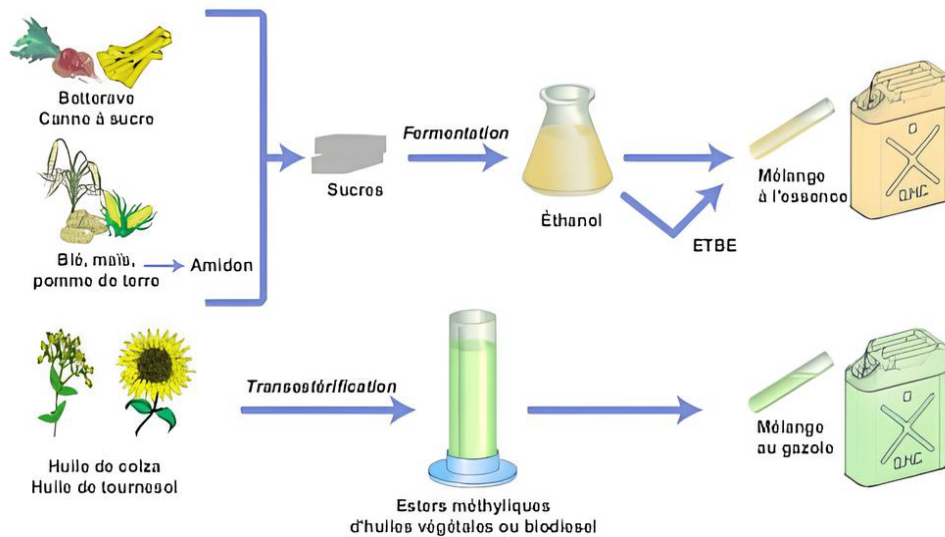


Fig. 1.5: Illustration de quelques types et procédés de bioraffinerie de 1ère génération.  
Source : d'après un mémoire académique sur la valorisation de la biomasse (consulté en ligne, 2025).

### Bioraffineries de deuxième génération

Les bioraffineries de deuxième génération se distinguent par l'utilisation de biomasse lignocellulosique comme matière première, permettant la valorisation des composants structuraux des plantes, tels que la cellulose, les hémicelluloses et les lignines.

L'un des atouts majeurs de cette filière réside dans l'exploitation de la source de carbone renouvelable la plus abondante sur Terre. En plus d'être largement disponible et variée, cette biomasse présente l'avantage de limiter les conflits d'usage avec les ressources agricoles destinées à l'alimentation, contrairement à la biomasse de première génération. D'un point de vue environnemental et économique, les bioraffineries de deuxième génération visent également à réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre ainsi que les coûts de production [47].

Toutefois, les technologies actuelles liées à la transformation et à la valorisation de cette biomasse restent encore peu développées et nécessitent d'être améliorées et optimisées pour atteindre une efficacité industrielle satisfaisante.

### 1.4.2 Bioraffineries de troisième génération

Les biocarburants de troisième génération sont principalement issus de la valorisation des micro-algues. Ces microorganismes peuvent être transformés par divers procédés en fonction de leur composition. Certaines espèces de micro-algues sont capables d'accumuler jusqu'à 80% de leur poids sec en acides gras, lesquels sont ensuite extraits et transestérifiés pour la production de biodiesel. D'autres variétés contiennent des sucres fermentescibles, qui peuvent être utilisés pour

la production de bioéthanol par fermentation. Par ailleurs, les micro-algues peuvent également être méthanisées afin de générer du biogaz. Bien que cette filière offre un potentiel élevé en termes de rendement, elle en est encore au stade de développement expérimental [48].

### 1.4.3 Bioraffineries intégrées

Les bioraffineries intégrées désignent des complexes industriels regroupant plusieurs unités de production, appartenant à une ou plusieurs entreprises, qui ne peuvent être qualifiées individuellement de bioraffinerie. Ces unités coopèrent en partageant les matières premières végétales, les flux énergétiques générés par leurs procédés, ainsi que les coproduits. Ces derniers sont réutilisés comme intrants dans d'autres installations du même site, favorisant ainsi une valorisation croisée.

Sur un même site, il est possible d'implanter différents types de bioraffineries utilisant diverses ressources végétales comme matières premières. Ces ressources sont transformées à l'aide de technologies de conversion variées, permettant de produire un éventail de produits, allant des biocarburants aux matériaux biosourcés [100].

Ce modèle intégré vise à optimiser à la fois la production d'énergie et celle de composés biosourcés, grâce à l'application conjointe de multiples procédés technologiques adaptés à différentes biomasses.

Aux États-Unis, une bioraffinerie hybride combinant les approches biochimique et thermo-chimique a déjà été mise en place, offrant des perspectives prometteuses pour améliorer la transformation de la biomasse en énergie renouvelable et en produits biosourcés. En Europe, des installations similaires ont vu le jour dans plusieurs pays, notamment en Allemagne, aux Pays-Bas, en France et en Belgique [101].

### 1.4.4 Caractéristiques et fonctions clés d'une bioraffinerie

**2.3.1- Matières premières diverses :** Les bioraffineries ont la capacité d'exploiter diverses matières premières issues de la biomasse, sélectionnées en fonction des ressources locales disponibles et des besoins spécifiques. Parmi les matières premières les plus utilisées, on retrouve les matières lignocellulosiques comme le bois et les résidus agricoles, ainsi que des ressources comme les algues et les déchets organiques, tels que les restes alimentaires ou les boues issues des stations d'épuration. [57] [53]

**2.3.2- Bioproduits :** Les bioraffineries sont conçues pour fabriquer une gamme variée de produits, et non un produit unique. Parmi ces produits, on trouve des biocarburants tels que l'éthanol et le biodiesel, des bioplastiques, des produits chimiques d'origine biologique, ainsi que des matériaux spéciaux [51] [56]

**2.3.3- Fractionnement et conversion :** La biomasse est traitée par des procédés physiques, chimiques et biologiques pour séparer et transformer ses composants. Par exemple, la biomasse

lignocellulosique est décomposée en sucres et lignine, chacun étant utilisé pour produire divers produits [53] [56].

**2.3.4- Efficacité des ressources :** Les bioraffineries visent à optimiser l'utilisation des ressources en valorisant tous les composants de la biomasse, tout en réduisant les déchets et en limitant leur impact environnemental [59].

**2.3.5- Chimie verte :** Les bioraffineries appliquent les principes de la chimie verte pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles, diminuer les émissions de gaz à effet de serre et limiter l'impact écologique des processus industriels [56].

### 1.4.5 Fonctionnement d'une bioraffinerie

Le fonctionnement d'une bioraffinerie se décompose en plusieurs étapes clés [57] [58] [59] [60] :

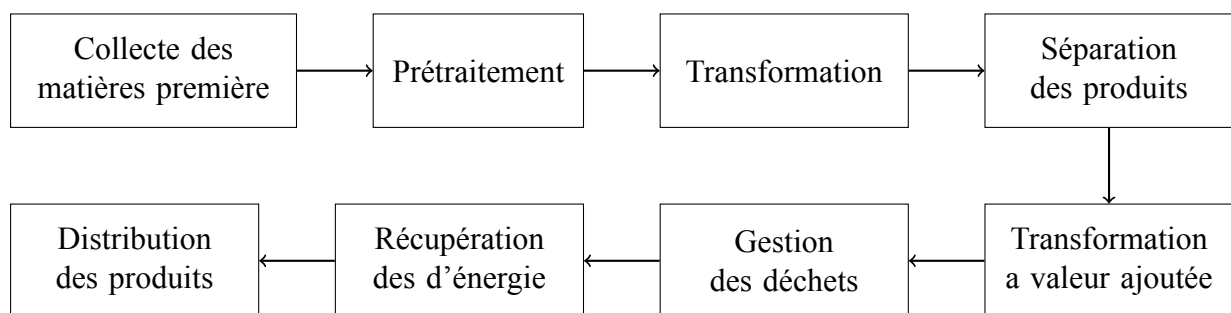


Fig. 1.6: Étapes clés du fonctionnement d'une bioraffinerie

**2.5.1- Collecte des matières premières :** Les différentes formes de biomasse, telles que les résidus agricoles, les déchets forestiers, les algues ou autres déchets organiques, sont collectées puis transportées vers l'installation de la bioraffinerie.

**2.5.2- Prétraitement :** La biomasse est souvent soumise à un prétraitement pour la rendre plus facile à traiter. Ce processus peut inclure des méthodes physiques et chimiques visant à décomposer les structures complexes et éliminer les impuretés, facilitant ainsi la conversion de la biomasse.

**2.5.3- Transformation :** Après prétraitement, la biomasse subit plusieurs procédés de conversion :

**2.5.3.1- Thermochimiques :** Chauffage à haute température pour produire des biocarburants, tels que par pyrolyse ou gazéification.

**2.5.3.2- Biochimiques :** Utilisation de micro-organismes (bactéries, levures) pour fermenter les sucres présents dans la biomasse et produire des biocarburants et autres bioproduits.

**2.5.3.3- Chimiques :** Réactions chimiques pour transformer la biomasse en produits tels que des bioplastiques et d'autres produits chimiques biosourcés.

**2.5.4- Séparation :** Les produits obtenus lors de la conversion peuvent être mélangés avec des sous-produits ou des impuretés. Des procédés de séparation tels que la distillation, la filtration et l'extraction permettent d'isoler les produits finis.

**2.5.5- Transformation à valeur ajoutée :** Les produits séparés peuvent être raffinés ou modifiés pour améliorer leur qualité, comme la purification des biocarburants.

**2.5.6- Gestion des déchets :** Les bioraffineries génèrent des déchets ou des résidus pendant la production. La gestion optimale de ces déchets est cruciale pour réduire leur impact environnemental, avec la possibilité de les réutiliser ou de les traiter pour d'autres usages.

**2.5.7- Récupération d'énergie :** L'énergie produite au cours de la conversion est souvent récupérée pour alimenter l'installation de bioraffinerie ou réinjectée dans le réseau énergétique.

**2.5.8- Distribution des produits :** Les produits finis, tels que les biocarburants et les bioplastiques, sont distribués pour diverses applications industrielles ou commerciales.

## 1.5 Différentes bioénergies

Les bioénergies regroupent l'ensemble des formes d'énergie issues de la valorisation de la biomasse. Elles peuvent se présenter sous forme de chaleur (par exemple, le bois-énergie), d'électricité (comme le biogaz provenant des effluents d'élevage), ou encore de carburants[99].

Dans un contexte de lutte contre le changement climatique et de réduction de la dépendance aux ressources fossiles, le recours à des alternatives énergétiques renouvelables s'impose. Les biocarburants apparaissent comme une option prometteuse déjà exploitée, mais dont le développement reste nécessaire afin d'optimiser leur efficacité et leur durabilité [97].

Parmi les principales formes de bioénergies, on distingue notamment le biogaz et les biocarburants, qui jouent un rôle central dans la transition énergétique actuelle.

### 1.5.1 Biogaz

Le biogaz est un gaz combustible composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone. Il est généré par le processus de fermentation anaérobie de la matière organique présente dans divers déchets. Cette production peut se faire naturellement, dans des milieux tels que les marais ou les sites d'enfouissement des ordures ménagères, mais elle peut également être contrôlée dans des installations techniques appelées digesteurs [98].

### 1.5.2 Biocarburant

C'est un combustible d'origine biologique, disponible sous forme liquide ou gazeuse, utilisé principalement dans le secteur du transport. Il est issu de la transformation de la biomasse. Le Tableau Tab. 1.1 présente une classification des différentes générations de biocarburants, également appelés agrocarburants lorsqu'ils proviennent de cultures agricoles spécifiques [99]. De manière générale, les biocarburants sont regroupés en deux grandes catégories selon leur origine et leur procédé de production :

#### **Biodiesel**

Le biodiesel constitue environ 27% de la production mondiale de biocarburants, mais sa part atteint plus de 77% sur le marché européen, où son développement est particulièrement marqué [104]. Ce biocarburant est obtenu par transestérification des huiles végétales (principalement des triglycérides), en présence d'un alcool tel que le méthanol ou l'éthanol, et d'un catalyseur alcalin, généralement de l'hydroxyde de sodium (NaOH) ou de potassium (KOH) [117].

#### **Le bioéthanol**

Le bioéthanol, forme d'énergie issue de la biomasse, constitue une alternative prometteuse à l'essence en tant que carburant. Il s'agit d'une ressource renouvelable souvent présentée comme une solution de substitution aux combustibles fossiles en voie d'épuisement. Traditionnellement, sa production repose sur des matières premières riches en sucres. Toutefois, cette approche soulève des préoccupations en raison de la concurrence qu'elle engendre entre les usages alimentaires et énergétiques des ressources agricoles. En réponse à cette problématique, les biomasses lignocellulosiques suscitent un intérêt croissant en tant que matière première pour la production d'éthanol. Leur large disponibilité ainsi que leur faible coût relatif en font une alternative plus durable et économiquement viable [106].

Le bioéthanol est produit par fermentation du sucre provenant des cultures sucrières (canne à sucre, betteraves, blé), ou provenant des cultures contenant de l'amidon (graines). La structure de l'amidon est une longue chaîne de polymère de glucose. Ce polymère ne peut pas être fermenté directement, la structure doit d'abord être cassée en des molécules de glucoses plus

petites puis dissoute dans de l'eau. Ce mélange est ensuite chauffé et traité avec une enzyme. Cette enzyme permet d'hydrolyser l'amidon en chaîne courte de glucose et est appelée amylase (enzyme digestive). La fermentation transforme alors les sucres ou l'amidon en éthanol et en dioxyde de carbone grâce à des levures telles que *Saccharomyces*. En théorie 51% du glucose est converti en éthanol, le reste est utilisé par la levure comme source d'énergie ce qui diminue l'efficacité de 40 à 48% [117].

Génération	1 <sup>re</sup> génération	2 <sup>e</sup> génération	3 <sup>e</sup> génération
<b>Origine des substrats</b>	Grains de blé, colza, tournesol	Déchets organiques (dattes, betterave sucrière, etc.)	Micro-algues
<b>Procédés mis en œuvre</b>	Fermentation, transestérification	Gazéification, hydrolyse enzymatique, méthanisation	Méthanisation, gazéification, fermentation
<b>Produit final</b>	Bioéthanol, biodiesel	Bio méthane, bioéthanol, biodiesel, bio hydrogène	Bio méthane, bioéthanol, biodiesel

Tab. 1.1: Différentes générations de biocarburants et les procédés de transformation pour chaque génération

[107]

## 1.6 Biomasse

La biomasse constitue une source d'énergie renouvelable particulièrement polyvalente. Elle peut en effet exister sous trois formes : liquide, solide et gazeuse [102]. Cette diversité lui confère une grande adaptabilité dans les différents secteurs énergétiques. Dans le domaine de l'énergie, le terme « biomasse » désigne principalement les matières organiques d'origine végétale ou animale. Il s'agit notamment des résidus agricoles, des déchets forestiers ainsi que des sous-produits des industries agroalimentaires. La définition inclut également la fraction biodégradable des déchets urbains et industriels [99].

### 1.6.1 Type de biomasse

Type de Biomasse	Exemples	Produits Obtenus	Procédés de Transformation
Biomasse agricole	- Paille de blé et de riz - Bagasse - Rafles de maïs - Tiges de tournesol	- Biocarburant (éthanol, biodiesel) - Biogaz - Bioplastiques - Fibres naturelles	- Fermentation (éthanol) - Pyrolyse (biocarburants) - Gazéification (syngaz)
Biomasse forestière	- Sciure et copeaux - Écorces - Branches mortes	- Bois énergie - Charbon de bois - Biocarburants solides	- Combustion ( bois_énergie ) - Gazéification (syngaz) - Hydrolyse enzymatique ( bioéthanol )
Biomasse issue des déchets	- Déchets alimentaires - Huiles usagées - Déchets agricoles ( fruits et légumes ) - Fumiers et lisiers d'animaux	- Biogaz (méthane) - Biodiesel - Compost - Biofertilisants	- Méthanisation (biogaz) - Transestérification ( biodiesel ) - Fermentation anaérobie (compost)
Cultures énergétiques	- Colza, tournesol (oléagineux) - Betterave et canne ( sucrières ) - Graminées énergétiques - Algues	- Biocarburants - Huiles végétales - Biomolécules	- Extraction (huiles) - Fermentation (éthanol) - Transestérification (biodiesel)
Biomasse aquatique	- Algues marines et d'eau douce - Lentilles d'eau - Plantes aquatiques (jacinthe d'eau)	- Biocarburants (biodiesel, bioéthanol) - Biomolécules - Engrais	- Hydrolyse enzymatique (bioéthanol) - Fermentation (biogaz) - Extraction chimique (huiles et protéines)
Biomasse industrielle	- Résidus de papeterie (boues de cellulose) - Effluents agro-industriels (laiteries, brasseries) - Déchets bois	- Biogaz - Biopolymères - Biofertilisants	- Digestion anaérobie (biogaz) - Chimie verte (bioplastiques) - Fermentation (acides organiques)

Tab. 1.2: Classification des types de biomasse et leurs procédés de transformation [65][66][68]

### 1.6.2 Biomasse lignocellulosique

La biomasse lignocellulosique est issue de différentes ressources. Elle comprend principalement, d'une part, les résidus générés par les activités agricoles, forestières et les industries du bois, et d'autre part, les matières ligneuses non commercialisables.[92]. La Figure 1.7 illustre les sources de la biomasse lignocellulosique.

#### **Les résidus (agricoles et forestiers) et les déchets de transformation de bois**

**Les résidus agricoles et forestiers :** les résidus agricoles sont définis comme étant les parties des plantes non utilisées, telles que les pailles de céréales, les tiges de maïs ou de colza ainsi que les déchets issus de la culture du palmier, tels que les feuilles sèches, etc. Bien que disponibles en grande quantité, ces sous-produits peuvent concurrencer l'alimentation des bétails[92]. Leur volume varie significativement selon les types de cultures. Les résidus forestiers, pour leur part, sont générés lors des opérations de coupe et de façonnage des arbres. Ils comprennent notamment les branches, les rameaux, ainsi que les feuilles.

**Les déchets des industries de transformation de bois :** Les déchets issus de la transformation du bois se répartissent en deux catégories principales. Les résidus secondaires proviennent des scieries et des industries du papier, incluant des sous-produits tels que les copeaux, la sciure, les écorces ou encore la liqueur noire. Les résidus tertiaires, quant à eux, désignent les bois usagés issus des chantiers de construction ou de démolition.[92].

#### **La matière lignocellulosique non marchande (les cultures dédiées, le bois mort)**

**Les cultures énergétiques dédiées :** Sont spécifiquement mises en place pour la production d'énergie. Elles incluent des plantes herbacées à cycle annuel, telles que le miscanthus ou le panic érigé, ainsi que des plantations ligneuses à rotation très courte, comme le saule et le peuplier, dont les rejets sont récoltés tous les deux à trois ans[92].

**Le bois mort :** Constitué d'arbres entiers ou de parties d'arbres ayant péri à la suite de perturbations naturelles telles que les infestations d'insectes, les inondations, la foudre ou les incendies, représente également une ressource potentielle pour la production de vecteurs énergétiques[93].

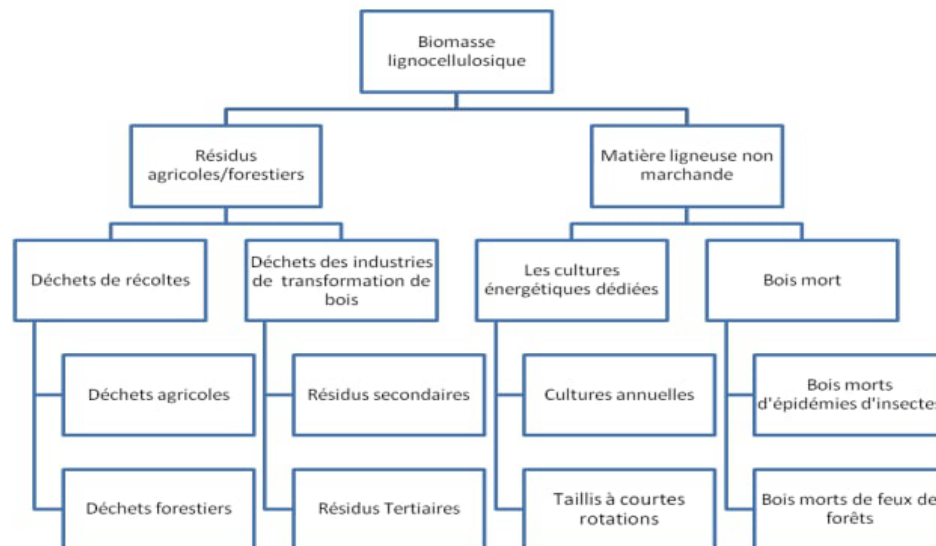


Fig. 1.7: Sources de la biomasse lignocellulosique

Source : d'après un mémoire académique sur la valorisation de la biomasse (consulté en ligne, 2025).

## 1.7 Approvisionnement en matières premières

### 1.7.1 Procédés de récolte de bois

Il existe trois principaux procédés de récolte de bois qui se différencient par le degré de transformation que subit l'arbre lors de la coupe :

#### Le procédé de récolte de bois par arbre entier

Ce mode d'exploitation consiste à abattre les arbres directement sur le site de coupe, puis à les débarder, branches incluses, jusqu'en bordure de route. C'est à cet emplacement que les arbres sont ensuite façonnés, généralement par ébranchage. Les troncs obtenus peuvent être tronçonnés avant leur transport vers les unités de transformation[94].

#### Le procédé de récolte de bois par tronc entier

Dans les forêts de résineux, la méthode de récolte par tronc entier implique l'abattage des arbres suivi de leur ébranchage directement sur le site de coupe. Les grumes ainsi préparées sont ensuite débardées jusqu'en bordure de route, avant d'être acheminées vers leur lieu de valorisation. En revanche, dans les forêts de feuillus, l'opération d'ébranchage est généralement remplacée par l'écimage, qui consiste à supprimer la cime ainsi que les branches de l'arbre[94].

#### Procédé de récolte de bois par bois tronçonnés

Ce procédé consiste à réaliser l'abattage, l'ébranchage et le tronçonnage des arbres directement sur le site de coupe, soit de manière simultanée, soit en plusieurs étapes successives.

Les billes obtenues sont ensuite débardées jusqu'en bordure de chemin forestier, avant d'être acheminées vers les zones de stockage ou les sites d'utilisation[94].

### 1.7.2 Procédés de récupération de la biomasse résiduelle

La biomasse résiduelle issue des opérations de récolte forestière présente un coût plus élevé que celui des sous-produits générés par les scieries. Cette différence s'explique principalement par la faible densité de la biomasse forestière brute, qui engendre des frais importants de débardage et de transport. Afin d'en améliorer la densité et de réduire ainsi les coûts logistiques, des techniques de fragmentation et de compaction ont été mises au point.

#### Fragmentation (broyage ou déchiquetage)

La fragmentation de la biomasse résiduelle en plaquettes forestières peut être réalisée par deux procédés principaux : le déchiquetage et le broyage. Le déchiquetage s'effectue à l'aide d'une machine équipée de couteaux rotatifs, permettant d'obtenir une granulométrie relativement homogène. En revanche, le broyage, réalisé à l'aide d'un broyeur à marteaux et enclumes, produit des particules sous forme de lamelles effilochées, avec une taille plus irrégulière. [14]. Ce dernier procédé présente toutefois l'avantage de pouvoir traiter des biomasses contaminées ainsi qu'une grande variété de matières lignocellulosiques, telles que les résidus de coupe, les fagots ou encore les troncs de bois mort[95].

#### Mise en fagots

Dans ce procédé, la biomasse résiduelle est compressée et attachée à l'aide d'une fagoteuse sous forme de fagots. Une tronçonneuse coupe ensuite les fagots à la longueur désirée [96].

## 1.8 Rôle des biotechnologies dans les bio-raffineries

Les biotechnologies utilisent des organismes vivants ou des enzymes pour catalyser des réactions chimiques. Elles permettent d'améliorer les procédés de transformation dans les bio-raffineries à différents niveaux :

### 1- Production de biocarburants :

**Fermentation microbienne** : Des microorganismes, comme les bactéries ou les levures, sont utilisés pour convertir les sucres de la biomasse en éthanol ou en biodiesel [68].

**Exemple** : L'utilisation de *Saccharomyces cerevisiae* pour produire de l'éthanol .

### 2- Extraction des produits chimiques :

**Biocatalyse** : Des enzymes spécifiques sont utilisées pour extraire des molécules précieuses (comme l'acide lactique ou l'acide succinique), servant de base à l'industrie chimique [69]

**Exemple :** L'acide lactique peut être utilisé pour produire du PLA, un bioplastique biodégradable.

**3- Valorisation des déchets :** Les biotechnologies permettent de transformer les résidus de biomasse en énergie (biogaz) ou en engrais organiques grâce à des procédés comme la méthanisation [70].

**4- Optimisation des matières premières :** Les biotechnologies facilitent la modification génétique des plantes pour augmenter leur rendement en biomasse ou leur contenu en sucres facilement convertibles [71].

**Exemple :** Le maïs ou la canne à sucre génétiquement modifiés pour une meilleure conversion en éthanol.

## **1.9 Conclusion**

Les bio-raffineries sont désormais au cœur de la transition énergétique, jouant un rôle clé dans la réduction de l’empreinte carbone et la production de ressources renouvelables. Elles contribuent également à l’émergence de bioéconomie en tant que modèle économique, dans lequel les ressources biologiques sont utilisées de manière plus efficace et durable. Les politiques publiques soutiennent l’innovation dans ce secteur afin d’accélérer la transition vers une économie plus verte.

## CHAPITRE 2

# BIORAFFINERIE DES PALMIERS DATTIERS

### 2.1 Introduction

Face aux enjeux environnementaux croissants et à la nécessité de valoriser les ressources agricoles, la bioraffinerie s'impose comme une solution durable pour le traitement et la valorisation des déchets lignocellulosiques. Le palmier dattier, largement cultivé dans les régions arides et semi-arides, génère une quantité importante de biomasse sous forme de sous-produits agricoles tels que les feuilles, les tiges, les rachis, les noyaux et les résidus de fruits. Cette biomasse présente un fort potentiel pour la production de bioproduits à haute valeur ajoutée tels que les biocarburants, les bioplastiques ou les biofertilisants.

Inspirées du modèle des raffineries pétrolières, les bioraffineries permettent de transformer cette biomasse en divers produits grâce à des procédés thermochimiques, biochimiques ou mécaniques. Elles peuvent être classées en plusieurs catégories : les bioraffineries à plateforme biochimique (fermentation, digestion anaérobie), thermochimique (pyrolyse, gazéification) et intégrée, qui combine plusieurs procédés afin d'optimiser la valorisation des ressources.

### 2.2 La palmeraie algérienne

La palmeraie algérienne comprend plus de 11 millions de palmiers dattiers, implantés principalement dans neuf wilayas sahariennes :

Biskra, El-Oued, Ouargla, Ghardaïa, Adrar, Béchar, Tamanrasset, Illizi et Tindouf.

On retrouve également des palmeraies dans d'autres wilayas situées en zone de transition entre la steppe et le Sahara. Celles-ci sont considérées comme marginales par rapport aux grandes palmeraies sahariennes [72].

En termes de superficie, les palmiers dattiers couvrent 103 129 hectares à l'échelle nationale. La répartition varie d'une wilaya à une autre, mais les plus vastes étendues se trouvent à Biskra et El-Oued, qui totalisent à elles seules 53 533 hectares, soit environ 52% de la superficie nationale dédiée à cette culture.

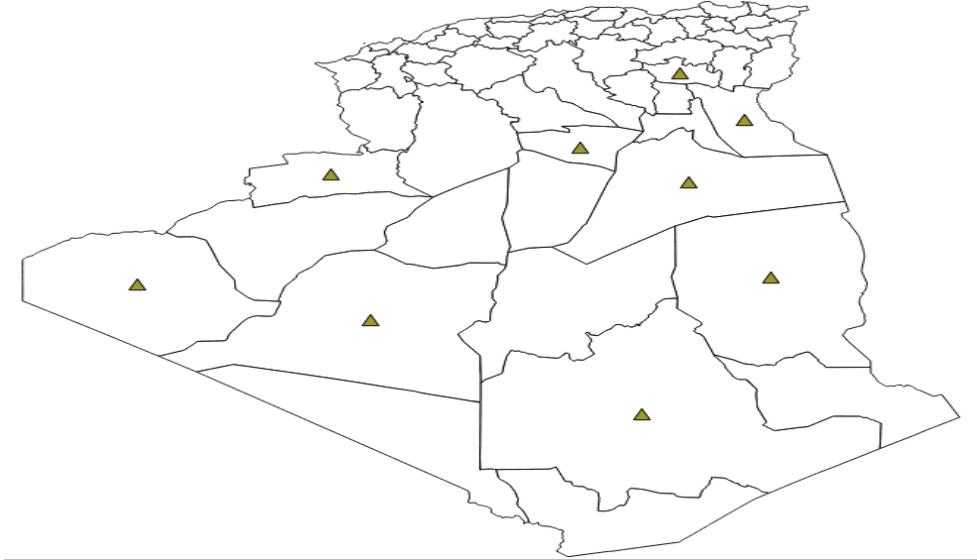


Fig. 2.1: Carte d'Algérie, «indiquant les Wilayas du Sud, Cœur de la Palmeraie Algérienne»  
Source : élaboration personnelle à partir de documents en ligne (2025)

### 2.3 Définitions et concepts des déchets :

Dans le langage courant, les déchets désignent les restes ou résidus considérés comme inutilisables ou non consommables, et donc dépourvus de valeur

Selon le Code de l'environnement, un déchet est tout résidu issu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, qu'il s'agisse de substances, de matériaux, de produits ou, plus largement, de tout bien meuble que son propriétaire a décidé d'abandonner [74].

Cependant, la perception des déchets évolue : ils tendent de plus en plus à être considérés comme des ressources réutilisables ou recyclables. Sur le plan économique, un déchet est vu comme un bien ou une matière dont la valeur marchande est nulle ou négative à un moment et dans un contexte donné.

Cette notion de "valeur nulle" reste néanmoins relative. [75]. souligne que lorsqu'un objet ne remplit plus sa fonction initiale pour une personne, il devient un déchet. Toutefois, ce même objet peut être réutilisé comme matière première secondaire par d'autres, selon le principe que «les déchets des uns font le bonheur des autres».

### 2.4 Toilettage :

Le toilettage consiste à éliminer les organes desséchés ou en cours de dessiccation qui entravent le développement, la productivité des palmiers ainsi que le travail de l'agriculteur. En moyenne, entre 5 et 18 palmes par palmier se dessèchent chaque année, ce qui rend nécessaire un entretien régulier.

Cette pratique produit une grande quantité de résidus (palmes, stipes, rejets, etc.) qui s'accumulent dans les parcelles (voir Fig 2.2 ), en raison de la diminution de leur réutilisation par les agriculteurs, qui privilégient désormais d'autres matériaux importés.

Dans toutes les wilayas de l'algerie, les palmeraies génèrent annuellement un volume important de sous-produits issus du palmier dattier. Cette biomasse non valorisée s'amasse dans les palmeraies, créant des zones de pollution visibles, propices au développement de champignons pathogènes pouvant se propager [76].



Fig. 2.2: Accumulation des sous-produits du palmier dattier à l'intérieur des parcelles  
Source : d'après un mémoire académique sur la valorisation de la biomasse (consulté en ligne, 2025)

## 2.5 Déchets des palmiers dattiers

Les résidus issus du palmier dattier constituent une source prometteuse de fibres naturelles, en raison de leur caractère renouvelable et de leur abondance. Cet arbre génère principalement huit types de sous-produits [77] :

### 2.5.1 Tronc :

Le tronc, appelé également stipe, est non ramifié et présente une silhouette élancée. Il est de teinte brune, lignifié, et entouré des bases sèches des anciens pétioles. Sa hauteur peut dépasser les 20 mètres. De forme généralement cylindrique, il possède un unique bourgeon terminal responsable de la croissance apicale, en produisant régulièrement de nouvelles palmes.

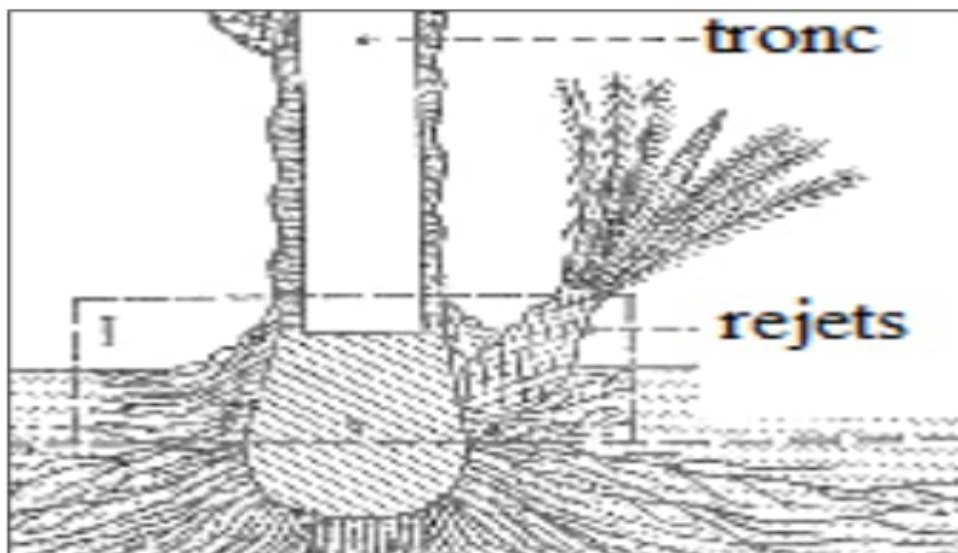


Fig. 2.3: Photo du tronc et les rejets.

Source : d'après un mémoire académique sur la valorisation de la biomasse (consulté en ligne, 2025)

La base du rachis, ou pétiole, est semi-cylindrique, plus ou moins ailé, et porte les épines (Choucas), et les folioles. Le pétiole est dur et relativement rigide (Fig 2.4)

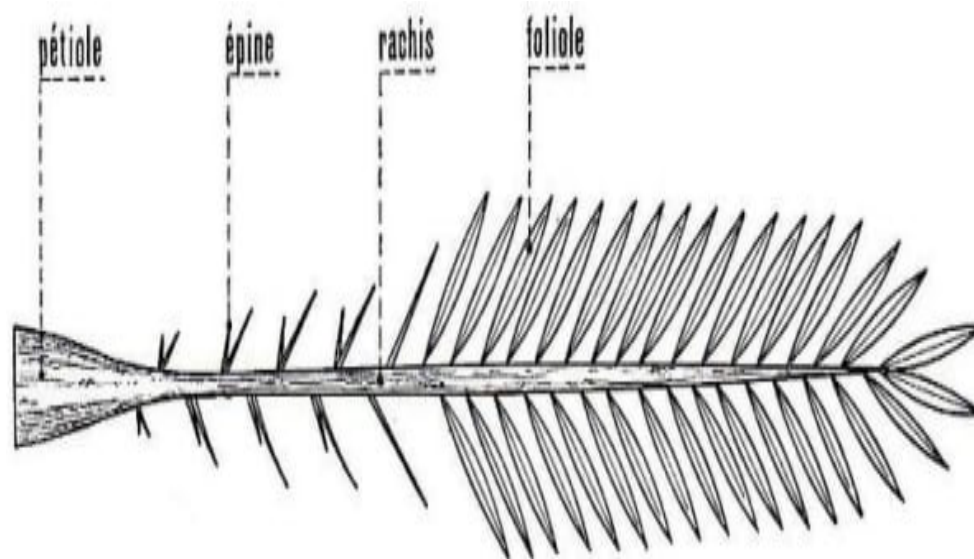


Fig. 2.4: Photo d'une palme.

Source : image extraite d'Internet (consultée sur Google Images, 2025)

### 2.5.2 Pétiole :

Le pétiole est la partie basale rigide de la palme, mesurant entre 50 cm et plus d'un mètre. Il soutient le rachis, sur lequel sont insérées les folioles à son extrémité et les épines à sa base, formant l'ensemble des pennes. Avec le rachis, il constitue l'axe central de la palme, qui peut subir des déviations dues à sa souplesse naturelle et à l'effet de la gravité.

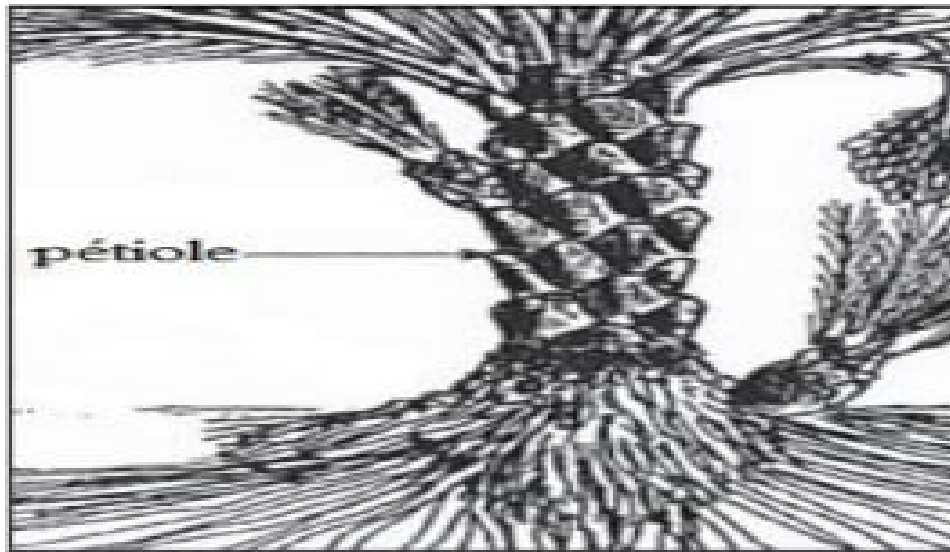


Fig. 2.5: Photo de pétiole.

Source : image extraite d'Internet (consultée sur Google Images, 2025)

### 2.5.3 Epines :

Les épines du palmier dattier sont des structures rigides et pointues situées à la base des pétioles. Elles sont issues de la transformation de folioles stériles, appelées également pennes épineuses. Disposées de manière alternée, elles peuvent mesurer plusieurs centimètres de long. Leur rôle principal est protecteur, empêchant l'accès des herbivores au cœur du palmier et à ses jeunes feuilles. Elles constituent également un critère d'identification variétale chez certaines souches de palmier dattier[79].

### 2.5.4 Rachis :

Le rachis est la partie centrale prolongée du pétiole, constituant l'axe principal de la palme. Il porte de manière alternée les folioles (ou pennes), qui sont les unités foliaires disposées obliquement de part et d'autre. De structure souple mais résistante, le rachis joue un rôle fondamental dans le soutien mécanique de la palme et dans l'orientation des folioles pour optimiser la photosynthèse. Sa longueur varie selon la variété du palmier et les conditions de croissance[87].

### 2.5.5 Fibrillum :

Le fibrillum, également connu sous les termes de fibres de surface du palmier dattier, mesh ou life, désigne un ensemble de faisceaux fibreux qui entourent le stipe. Il est composé de trois couches superposées, formées de plaques quasi rectangulaires d'une longueur variant entre 300 et 500 mm et d'une largeur de 200 à 300 mm. Le rôle écologique de ces fibres est double : elles

renforcent la structure du tronc tout en protégeant celui-ci contre les impacts extérieurs et l'intense chaleur du désert. Lors de l'entretien annuel des palmiers, un palmier dattier peut perdre entre 3 et 10 kg de fibrillium.

### 2.5.6 Feuilles :

Les palmes, localement appelées Djérid , constituent les feuilles du palmier dattier. Elles sont composées de folioles disposées de manière oblique et régulière le long du rachis, qui prolonge le pétiole. L'ensemble des palmes situées au sommet du stipe forme ce qu'on appelle la couronne foliaire, dont l'envergure peut atteindre jusqu'à 7 mètres. Chaque année, le palmier renouvelle une partie de ces feuilles par un cycle de croissance continu.

### 2.5.7 Spathe :

Le palmier dattier est une espèce dioïque, c'est-à-dire que les individus sont soit mâles, soit femelles. Les organes reproducteurs prennent la forme d'inflorescences unisexuées, portées séparément par les palmiers mâles et femelles. Ces inflorescences sont protégées par des spathe de forme fusiforme, ligneuses et fermées, semblables à des épis. De teinte vert jaunâtre, elles se développent à partir de bourgeons situés à l'aisselle des palmes.



Fig. 2.6: Photo d'une palme.

Source : d'après un mémoire académique sur la valorisation de la biomasse (consulté en ligne, 2025)

### 2.5.8 Grappes :

Les grappes, également appelées régimes, représentent les structures fructifères femelles du palmier dattier. Elles sont composées d'un axe principal ramifié portant un grand nombre de fruits, les dattes. Chaque grappe peut contenir plusieurs centaines de dattes et atteindre un poids de 10 à 20 kg selon les conditions culturales et la variété. Leur développement résulte de la fécondation des inflorescences femelles, généralement assistée par la pollinisation manuelle dans les palmeraies[87].

À cette liste, il est possible d'ajouter les noyaux de dattes, considérés comme un neuvième résidu. Ces matières sont principalement récupérées lors des opérations d'élagage saisonnier, une pratique agricole courante dans les régions oasiennes.

Parmi ces sous-produits, les feuilles de palmier jouent un rôle majeur en tant que source de fibres végétales. Leur utilisation s'est étendue à de nombreux domaines, notamment dans l'élaboration de matériaux composites, d'isolants écologiques ou encore de produits biodégradables. Malgré ce potentiel, l'exploitation industrielle du palmier dattier reste encore limitée [81].

Sur le plan socioéconomique, le palmier dattier revêt une importance capitale, en particulier dans les régions d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient. Ces zones regroupent environ 62 millions de palmiers sur les 105 millions que compte le monde, répartis sur plus d'un million d'hectares. Au-delà de la production de dattes, ces arbres sont également utilisés pour fournir du bois, du combustible et des matériaux servant à protéger les cultures agricoles [82].

À l'échelle mondiale, la quantité de déchets issus des palmiers dattiers est estimée à environ 1,5 million de tonnes par an, dont 125 000 tonnes sont générées en Algérie, soit 8,33 % du total. Ce volume considérable de résidus représente une opportunité réelle pour la mise en place de filières de valorisation à la fois économiques et écologiques [83].

## 2.6 Gestion des déchets du palmier dattier

Le déchet reflète, [84], la surconsommation dans les pays industrialisés et l'absence de solutions efficaces dans les pays en développement.

La notion de gestion, d'après le Petit Larousse, désigne l'acte d'organiser, d'administrer ou de diriger une activité ou une ressource. Toutefois, cette définition reste trop vague lorsqu'il s'agit de la gestion spécifique des déchets issus des palmiers dattiers.

En Algérie, la loi 01-19 encadre cette gestion en la décrivant comme l'ensemble des opérations liées à la collecte, la sélection, le transport, le stockage, la valorisation ainsi que l'élimination des déchets, en incluant également le suivi de ces étapes.

La stratégie nationale en matière de gestion des déchets repose généralement sur trois catégories d'outils : les dispositifs réglementaires, les mécanismes économiques (comme les taxes ou incitations) et les actions de sensibilisation et de formation. D'après [85], le palmier dattier génère plusieurs sous-produits réutilisables par les agriculteurs dans des domaines variés tels que l'artisanat, le bâtiment ou encore la production d'énergie.

## 2.7 Différents types de déchets du palmier dattier

Dans une bioraffinerie, les différents types de déchets du palmier dattier (tronc, pétiole, fibrium, rachis, épines, feuilles, spathe et grappes) peuvent être valorisés selon divers procédés de transformation. Voici un tableau détaillé des transformations possibles selon les composants :

<b>Partie du palmier</b>	<b>Composition principale</b>	<b>Procédés de transformation en bioraffinerie</b>	<b>Produits obtenus</b>
Tronc	Cellulose, hémicellulose, lignine	Pyrolyse, hydrolyse enzymatique, fermentation	Biochar, bio-huile, bioéthanol, biogaz
Pétiole (base de la palme)	Fibres cellulosiques, lignine	Broyage + digestion anaérobie, extrusion, compaction	Biogaz, bio-composites, panneaux agglomérés
Épines	Lignine, silice, fibres dures	Combustion directe, co-combustion, broyage	Énergie thermique, matériaux abrasifs
Rachis	Lignocellulose	Gazéification, pyrolyse, compostage	Syngas (gaz de synthèse), biochar, compost
Fibrium (fibres fines)	Cellulose, lignine	Bioraffinage enzymatique, traitement alcalin	Bio-polymères, pâte à papier, isolants
Feuilles (palmes)	Lignocellulose, minéraux	Digestion anaérobie, compostage, broyage	Biogaz, compost, bio-fertilisants
Spathe et grappes	Matière organique, sucres résiduels	Fermentation alcoolique, compostage	Éthanol, acide lactique, biofertilisants

Tab. 2.1: Valorisation des différents types de déchets du palmier dattier en bioraffinerie

Source : *Élaboration personnelle à partir des données de [87] [88] [89] [90] [91].*

## 2.8 Demande de bioéthanol, biogaz et biodiesel en algerie

En Algérie, la demande en bioéthanol, biodiesel et biogaz connaît une croissance significative. Issus de la valorisation des déchets organiques, agricoles ou industriels, ces biocarburants trouvent aujourd’hui des applications variées dans plusieurs secteurs clés. Le bioéthanol est particulièrement recherché dans les industries pharmaceutique, cosmétique et agroalimentaire. Le biodiesel, quant à lui, répond aux besoins du transport urbain, des exploitations agricoles et des entreprises de gestion des déchets. Le biogaz représente enfin une solution énergétique durable, notamment pour les industries agroalimentaires, les stations d’épuration . Cette diversité d’usages reflète une demande croissante et multisectorielle répartie à travers l’ensemble du territoire national.

### 2.8.1 Principales entreprises pharmaceutiques en Algérie et leurs usages potentiels du bioéthanol

Les régions d’Algérie où l’usage du bioéthanol est particulièrement nécessaire dans l’industries pharmaceutique et cosmétiques correspondent aux wilayas regroupant le plus d’entreprises de fabrication pharmaceutique [129].

Entreprise	Secteur d’activité	Localisation (Wilaya)	Usage potentiel du bioéthanol
Saidal	Pharmaceutique	Alger, Médéa, Constantine, Annaba, Cherchell	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
Laboratoires Frater-Razes	Pharmaceutique	Alger	Désinfectant, solvant dans la fabrication pharmaceutique
Laboratoires Bio-pharm	Pharmaceutique	Alger	Ingrédient pharmaceutique et antiseptique
El Kendi Industrie du Médicament	Pharmaceutique	Alger	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
Evexia Pharma	Pharmaceutique	Constantine	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
GEOPHARM	Pharmaceutique	Oran	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments

<b>Entreprise</b>	<b>Secteur d'activité</b>	<b>Localisation (Wilaya)</b>	<b>Usage potentiel du bioéthanol</b>
Laboratoire API	Pharmaceutique	Constantine	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
Laboratoire OLEASSENS	Pharmaceutique	Constantine	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
Laboratoires ILP	Pharmaceutique	Tlemcen	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
LPA (Laboratoire Pharmaceutique Algérien)	Pharmaceutique	Annaba	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
BIOPURE	Pharmaceutique	Blida	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
PHARMETHIC	Pharmaceutique	Blida	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
PHARMA SPHERE	Pharmaceutique	Blida	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
OPTIPHARM	Pharmaceutique	Sétif	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
GENIS Produits Pharmaceutiques	Pharmaceutique	Sétif	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
ALDAPH	Pharmaceutique	Tizi Ouzou	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
LABORATOIRES PHARMAGH-REB	Pharmaceutique	Oran	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
LABORATOIRES INPHA-MEDIS	Pharmaceutique	El Tarf	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
HYSA	Pharmaceutique	Sidi Bel Abbès	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments

<b>Entreprise</b>	<b>Secteur d'activité</b>	<b>Localisation (Wilaya)</b>	<b>Usage potentiel du bioéthanol</b>
LABIOCO	Pharmaceutique	Blida	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
IMGSA	Pharmaceutique	Oum El Bouaghi	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
BIOREM	Pharmaceutique	Jijel	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
BIOGALENIC	Pharmaceutique	Constantine	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
ISOPHARM Algérie	Pharmaceutique	Constantine	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
NAD PHARMADIC	Pharmaceutique	Constantine	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
PHYSIOPHARM	Pharmaceutique	Constantine	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
LABORATOIRE MOBEN	Pharmaceutique	Oran	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
PROCHIMA SIGMA	Pharmaceutique	Tlemcen	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
TABET PHARM	Pharmaceutique	Sidi Bel Abbès	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
LABORATOIRE M.M	Pharmaceutique	Annaba	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments
EVOLAB	Pharmaceutique	Annaba	Solvant et ingrédient dans la fabrication de médicaments

Tab. 2.2: Identification des entreprises Pharmaceutique industrielles à potentiel d'intégration du bioéthanol dans leurs procédés en Algérie

*Source : Élaboration personnelle*

## 2.8.2 Principales entreprises cosmetiques en Algérie et leurs usages potentiels du bioéthanol

Entreprise	Secteur d'activité	Localisation (Wilaya)	Usage potentiel du bioéthanol
Parfums Wou-roud	cosmetique	El Oued	Solvant dans la fabrication de parfums, désinfectant pour les équipements de production
Ines Cosmetics	cosmetique	Bordj Bou Arréridj	Solvant dans les soins de la peau et des cheveux, désinfectant pour les équipements
Abusaad Cosmétiques	cosmetique	Alger	Solvant dans les produits capillaires et visage, désinfectant
Laboratoire Vénus	cosmetique	Blida	Solvant dans la fabrication de cosmétiques, désinfectant
Piove Cosmetics	cosmetique	Alger	Solvant dans les produits de maquillage, désinfectant
Advancare Industries	cosmetique	Blida	Solvant dans les cosmétiques pour bébés, désinfectant
Ghalia Driouche Cosmétique	cosmetique	Tipaza	Solvant dans les produits cosmétiques, désinfectant
Skin Beauty	cosmetique	Batna	Solvant dans les crèmes de soin, désinfectant
Doriane Care	cosmetique	Sétif	Solvant dans les cosmétiques, désinfectant
Sali Cosmétiques	cosmetique	Tipaza	Solvant dans la fabrication de cosmétiques, désinfectant

Tab. 2.3: Identification des entreprises cosmetiques industrielles à potentiel d'intégration du bioéthanol dans leurs procédés en Algérie

*Source : Élaboration personnelle*

### 2.8.3 Principales entreprises en Algérie et leurs usages potentiels du bio-diesel

Entreprise	Secteur d'activité	Localisation (Wilaya)	Usage potentiel du bioéthanol
Agriculture	Fermes pilotes, domaines agricoles (ex. Groupe AGRODIV)	Adrar, El Oued, Biskra	Carburant pour tracteurs, moissonneuses, pompes d'irrigation
Collecte des déchets	Netcom, Extra-net, entreprises municipales de propreté	Alger, Oran, Annaba, etc.	Biodiesel pour camions-bennes et véhicules de collecte
Logistique industrielle	Cevital, Condor, Hamoud Boualem, Laiterie Soummam, NCA-Rouiba	Béjaïa, Sétif, Alger, Blida	Biodiesel dans le transport de marchandises
Services pétroliers	Sonatrach, Naftal	Hassi Messaoud, Skikda	Carburant pour véhicules logistiques sur site
Zones portuaires	Entreprises portuaires (ex. EPAL – Port d'Alger)	Alger, Oran, Skikda	Biodiesel pour engins de manutention portuaire et navires auxiliaires
Construction & BTP	Cosider, Sapt, Infrarail, entreprises de BTP	Alger, Constantine, Tlemcen	Carburant pour engins de chantier et générateurs
Secteur minier	ENOR, Manadjim El Djazaïr, Somifer	Tamanrasset, Tébessa	Utilisation pour engins extractifs et de transport minier

Tab. 2.4: Identification des entreprises industrielles à potentiel d'intégration du bio-diesel dans leurs procédés en Algérie

Source : *Élaboration personnelle*

## 2.8.4 Principales entreprises en Algérie et leurs usages potentiels du biogaz

Entreprise	Secteur d'activité	Localisation (Wilaya)	Usage potentiel du biogaz
<b>Giplait</b>	Laiterie et dérivés	Sétif, Blida, Alger, Constantine	Production de chaleur pour la pasteurisation, autoconsommation énergétique
<b>Numidia Lait</b>	Agroalimentaire (lait)	Constantine	Valorisation des effluents d'élevage et déchets de production
<b>Sarl Danone Djurdjura</b>	Agroalimentaire (lait)	Blida	Cogénération chaleur-électricité, traitement des déchets organiques
<b>Société de Gestion des Abattoirs (SGA)</b>	Viande / abattoirs	Alger, Tizi-Ouzou, Sétif	Production de biogaz à partir des déchets organiques (sang, viscères, etc.)
<b>Sarl Hodna Lait (Trèfle)</b>	Laiterie / yaourts	M'Sila	Utilisation du biogaz pour le chauffage et la production de vapeur
<b>Amor Benamor</b>	Agroalimentaire (pâtes)	Guelma	Valorisation des déchets de blé et de process de transformation
<b>Cevital (Hygiène et sucre)</b>	Agro-industriel sucrier	Béjaïa	Production d'énergie à partir de résidus organiques (bagasse, eaux usées)
<b>SABM (Société Algérienne des Boissons Modernes)</b>	Agroalimentaire	Oran	Traitement des effluents industriels, autoconsommation
<b>Ferme pilote de Hassi Bahbah</b>	Élevage bovin / agriculture	Djelfa	Traitement du fumier et lisier pour produire du biogaz et du digestat
<b>Office National d'Assainissement (ONA)</b>	Assainissement urbain	Alger, Oran, Constantine	Production de biogaz à partir de boues d'épuration

Tab. 2.5: Entreprises en Algérie présentant un besoin potentiel en biogaz comme source d'énergie directe

[141]

## 2.9 Revue de la littérature relative à la planification de la production dans les chaînes d'approvisionnement de la bio-énergie

Les études pertinentes peuvent être classées en trois catégories. Premièrement, celles qui se sont concentrées sur l'implantation d'un point de collecte de biomasse destinée à être transformée dans d'autres bioraffineries. Deuxièmement, celles qui se sont intéressées à la conception d'un nouveau réseau de production de bioénergie et/ou de biocarburants à partir de biomasse, avec pour objectif de localiser les bioraffineries (fournisseurs et centres de distribution) [131]. Troisièmement, celles qui se sont focalisées sur la planification de la production d'une bioraffinerie existante. Peu d'études relèvent de cette troisième catégorie.

### 2.9.1 Problème p-median

Le problème de la p-médiane constitue l'un des modèles les plus couramment utilisés pour aborder des situations complexes de localisation. Il consiste à déterminer un nombre prédéfini de sites, appelés p-médianes, de manière à minimiser la somme des distances ou des coûts de transport entre ces sites et un ensemble de points de demande. Ce modèle est particulièrement pertinent lorsque la proximité et l'accessibilité aux bénéficiaires ou aux clients représentent un critère essentiel.

Son champ d'application est vaste, allant de la planification des emplacements de centres d'urgence, de dépôts logistiques ou d'agences de services, à l'optimisation de la couverture territoriale avec un nombre limité d'infrastructures. Le problème de la p-médiane repose sur des techniques avancées d'optimisation mathématique et de modélisation algorithmique, permettant de traiter de larges réseaux comportant de nombreux points de demande. Il constitue ainsi un outil d'aide à la décision efficace pour les entreprises et les institutions publiques, en intégrant des objectifs de réduction des coûts et d'amélioration de la performance opérationnelle.

#### **Implantation optimale d'un point de collecte**

La biomasse, en tant que matière première propre pour la production d'énergie, suscite un intérêt croissant ces dernières années en comparaison aux combustibles fossiles. Cette ressource précieuse présente cependant certaines caractéristiques qui influencent l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. Deux défis majeurs pour les bioraffineries dans leur planification de production sont la disponibilité de la biomasse et sa périssabilité. L'un des moyens de faire face au problème de disponibilité (selon les différentes périodes de l'année) consiste à stocker la biomasse. Toutefois, la biomasse étant une matière périssable, son stockage prolongé affecte sa qualité, en raison de réactions chimiques qui se produisent au cours de cette période [132], la qualité de la biomasse joue un rôle déterminant dans le processus de production [133], ce qui a un impact direct sur la planification des activités au sein des bioraffineries.

Le choix de ces wilayas comme sites candidats pour l'implantation d'un centre de collecte s'explique par leur position géographique stratégique, qui facilite la centralisation et le transport des résidus de palmiers dattiers vers les unités de valorisation énergétique.

Neuf régions de palmeraies ont été identifiées comme principales sources de matières premières, à savoir : Biskra, El-Oued, Ouargla, Ghardaïa, Adrar, Béchar, Tamanrasset, Illizi et Tindouf. Ces zones constituent un potentiel important pour l'approvisionnement de la bioraffinerie. Par ailleurs, quatre sites ont été retenus comme points candidats pour la mise en place d'un centre de collecte, à savoir : Médéa, Bouira, M'sila et Ain defla.

ID	Points de collecte	ID	Points condidats
1	Biskra	1	Media
2	El-Oued		
3	Ouargla	2	Ain defla
4	Ghardaïa		
5	Adrar	3	Bouira
6	Béchar		
7	Tamanrasset	4	M'sila
8	Illizi		
9	Tindouf		

Tab. 2.6: Points de collecte de matières premières et sites candidats pour l'implantation d'un centre de collecte

Les points de collecte de matières premières, ainsi que les sites candidats pour l'implantation d'un centre de collecte, ont été intégrés dans QGIS afin d'en assurer la visualisation et l'analyse spatiale. Cette démarche vise à représenter leur répartition géographique, à évaluer leur accessibilité et à étudier différentes alternatives en vue de déterminer l'implantation optimale du centre de collecte.

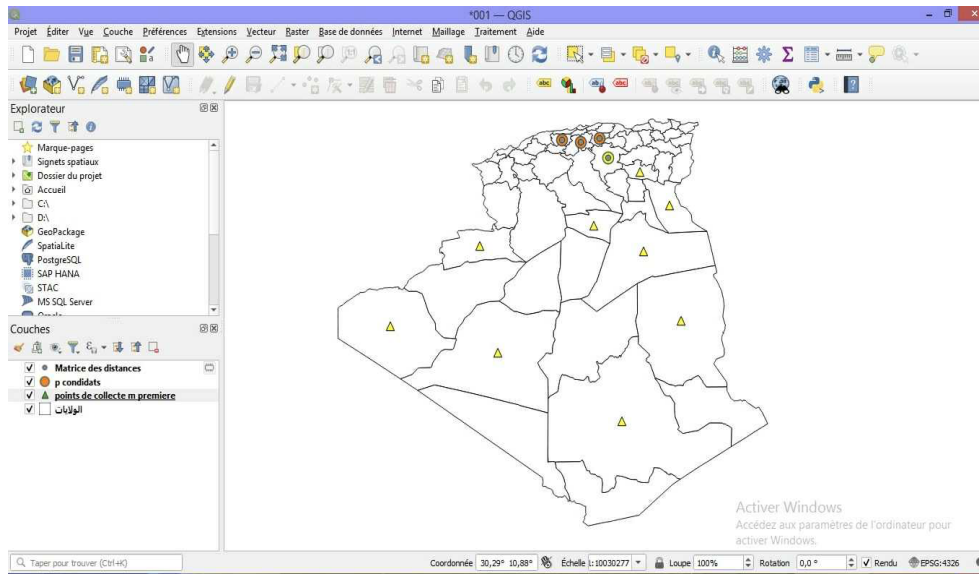


Fig. 2.7: Implantation des points de collecte et des sites candidats dans QGIS  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

## Modele formulation

### Paramètres

**d<sub>ij</sub>** : Distance de desserte entre le point de collecte *i* et le centre candidat *j*.

**p** : Nombre total d'entrepôts (médianes) à ouvrir.

### Variables de décision

**x<sub>ij</sub>** : Variable binaire, égale à 1 si le point de collecte *i* est attribué au point candidat *j*, et 0 sinon.

**y<sub>j</sub>** : Variable binaire, égale à 1 si l'entrepôt *j* est sélectionné comme une médiane, et 0 sinon.

## Fonction objectif

La fonction objectif (1) du modèle proposé vise à minimiser la distance totale de transport entre les points de collecte et les centres candidats sélectionnés. Elle est exprimée comme la somme des distances *d<sub>ij</sub>* multipliées par la variable binaire *x<sub>ij</sub>*, qui indique si le point de collecte *i* est attribué au centre *j*. Ainsi, le modèle cherche à réduire au maximum le coût global de transport en optimisant l'affectation des points de collecte aux centres ouverts.

$$\min \sum_i \sum_j d_{i,j} \cdot X_{i,j} \quad (1)$$

**Contraintes**

Les contraintes du modèle s'énoncent comme suit. Tout d'abord, chaque point de demande  $i$  doit être affecté exactement à un et un seul centre  $j$ , ce qui est assuré par la contrainte (2) Ensuite, la contrainte (3) garantit qu'un point de demande ne peut être attribué qu'à un centre effectivement ouvert. Par ailleurs, la contrainte (4) impose que le nombre total de centres ouverts soit exactement égal à  $p$ . Enfin, les contraintes d'intégrité(5) définissent la nature binaire des variables de décision

$$\sum_j X_{i,j} = 1, \quad \forall i \quad (2)$$

$$X_{i,j} \leq Y_j, \quad \forall i, \forall j \quad (3)$$

$$\sum_j Y_j = p \quad (4)$$

$$X_{i,j} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall j$$

$$Y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \quad (5)$$

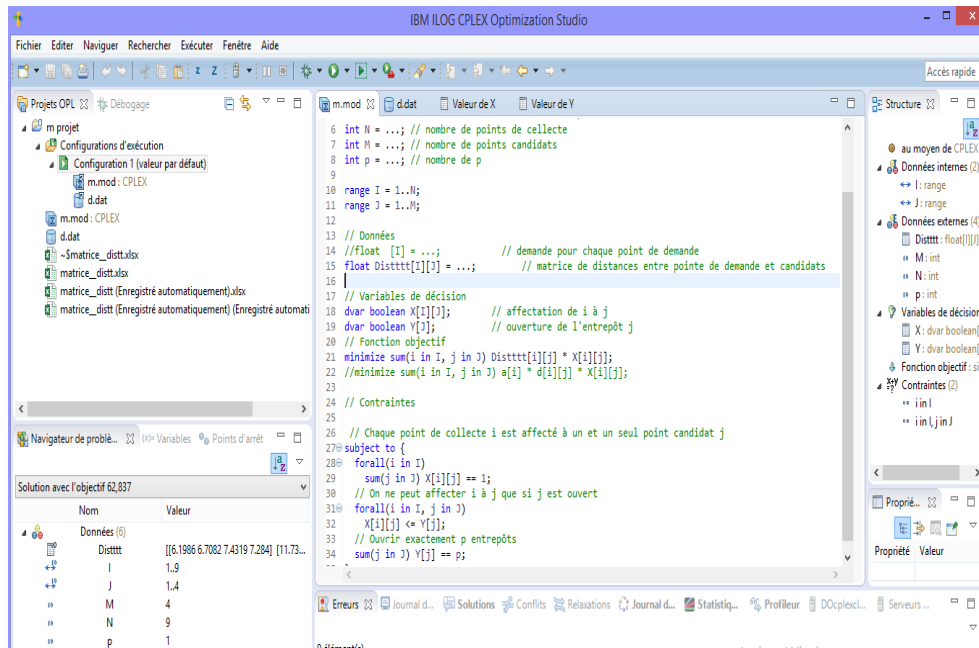


Fig. 2.8: Résultats de la formulation du modèle sous CPLEX  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

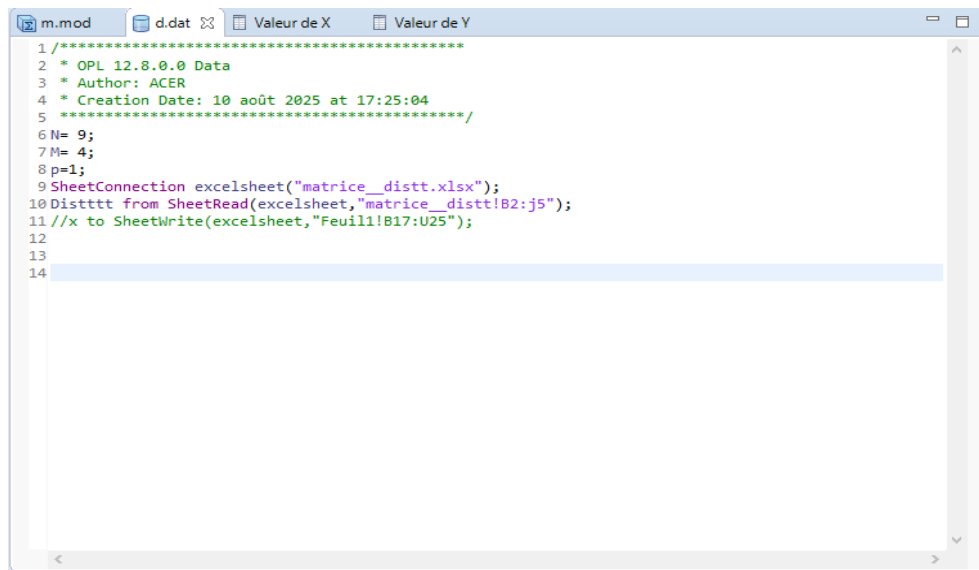


Fig. 2.9: Résultats de la formulation du modèle sous CPLEX  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

La formulation mathématique du modèle a été intégrée dans le solveur IBM ILOG CPLEX afin de permettre sa résolution. Cette étape a consisté à traduire les variables de décision, la fonction objectif ainsi que l'ensemble des contraintes du modèle sous un format compatible avec l'optimiseur. L'utilisation de CPLEX a ainsi permis d'obtenir une solution optimale répondant au problème d'implantation étudié.

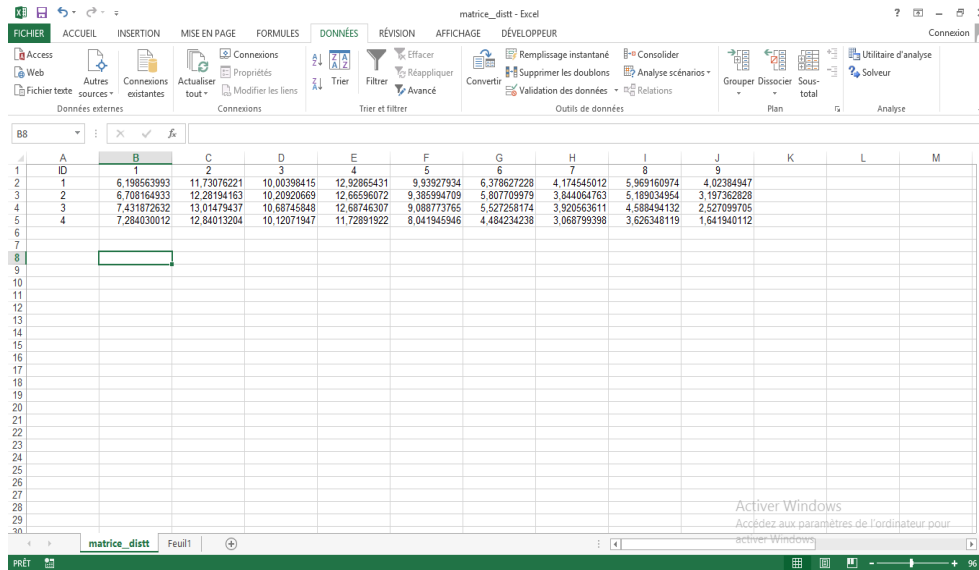


Fig. 2.10: Extraction de la matrice des distances sous Excel  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

La matrice de distance a été élaborée et intégrée à l'aide d'Excel afin de représenter les distances entre les différents points étudiés. Cette étape a permis de structurer les données nécessaires à la modélisation et de fournir une base fiable pour l'optimisation dans le cadre du problème d'implantation de centre de collecte.

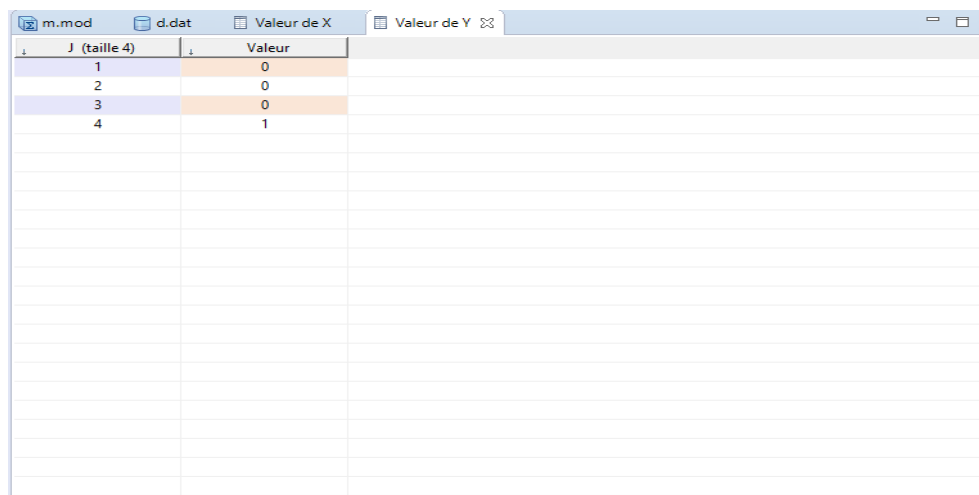


Fig. 2.11: Résultats finaux de l'implantation obtenus sous CPLEX  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

À la suite des résultats obtenus via CPLEX, l'implantation optimale du centre de collecte a été déterminée. L'analyse a montré que le site le plus adapté correspond au 4<sup>ème</sup> point candidat, situé à M'Sila. Afin de mieux visualiser et analyser cette solution, le résultat a ensuite été intégré dans QGIS, ce qui a permis de représenter géographiquement le centre de collecte retenu ainsi que sa relation avec les autres points du réseau

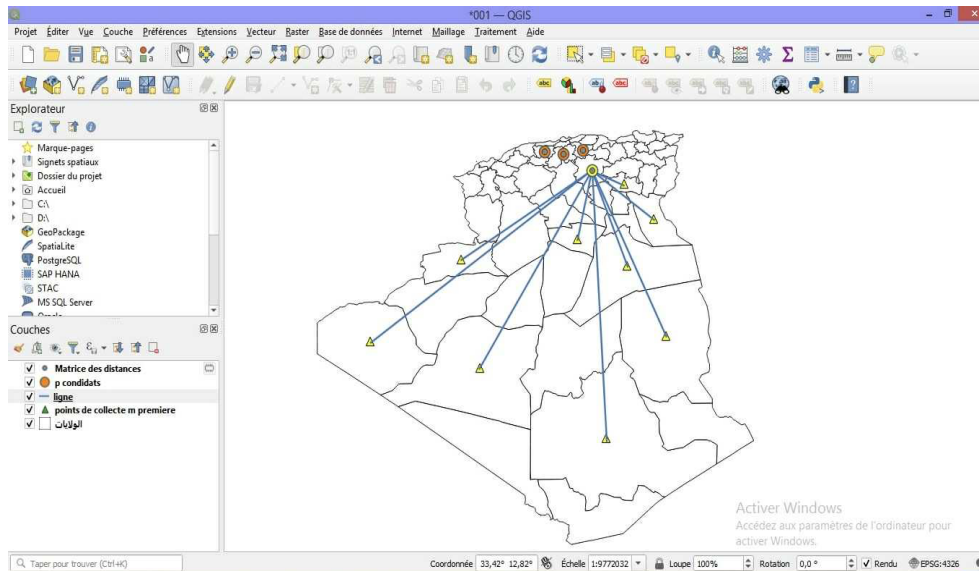


Fig. 2.12: Localisation optimale représentée sur QGIS  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

## **2.10 Conclusion**

L'étude conduite à travers la modélisation du problème sous CPLEX a permis d'identifier avec précision le site optimal pour l'implantation du centre de collecte. Cette approche méthodologique, fondée sur la résolution d'un modèle d'optimisation, a démontré sa capacité à fournir une configuration à la fois rationnelle et adaptée aux spécificités du réseau étudié. Les résultats issus de cette analyse ont mis en évidence que le site de M'Sila constitue la localisation la plus pertinente parmi l'ensemble des sites candidats considérés, répondant ainsi aux critères de minimisation des coûts et d'amélioration de l'accessibilité.

Afin d'assurer une meilleure interprétation et une exploitation plus pratique de ces résultats, la solution obtenue a été intégrée dans l'environnement QGIS. Cette étape de cartographie a permis de représenter de manière géographique et visuelle le centre de collecte retenu, tout en illustrant ses relations fonctionnelles avec les différents pôles de demande du réseau. Ce passage de l'abstraction mathématique à une représentation spatiale concrète constitue un atout considérable, car il offre aux décideurs une vision claire et intuitive de l'implantation optimale.

En définitive, cette démarche constitue une avancée significative dans le processus de planification stratégique, puisqu'elle associe la rigueur scientifique de l'optimisation mathématique à l'efficacité des outils de cartographie décisionnelle. Cette complémentarité renforce la validité et la pertinence des résultats obtenus, tout en ouvrant la voie à une applicabilité concrète dans des contextes réels de gestion et de planification logistique.

## CHAPITRE 3

# ÉTUDE DES MODÈLES DE BIORAFFINERIE : BIOGAZ, BIOÉTHANOL ET MULTI-PRODUIT

### 3.1 Introduction

Les préoccupations croissantes liées à la sécurité énergétique et aux impacts environnementaux des combustibles fossiles ont conduit la communauté scientifique à explorer des alternatives plus durables, notamment les sources d'énergie renouvelables. Parmi celles-ci, la bio-énergie, issue de la valorisation de la biomasse, suscite un intérêt grandissant en raison de la diversité des matières premières disponibles [134] [135]. Dans ce contexte, la bioraffinerie apparaît comme une approche innovante permettant la transformation efficace des ressources organiques en énergie. Plus particulièrement, les déchets lignocellulosiques issus des palmiers-dattiers — abondants dans les régions productrices de dattes — représentent une source prometteuse pour la production de biogaz, bioéthanol via digestion anaérobie. Grâce à des technologies adaptées, ces résidus agricoles peuvent être convertis en méthane, contribuant ainsi à la transition énergétique tout en assurant une gestion durable des déchets [136] [137].

Ce chapitre s'intéresse à la bioraffinerie de ces déchets avec un focus particulier sur la production de biogaz, bioéthanol et multi-produit

### 3.2 Étude du problème d'implantation de la bioraffinerie de biogaz

La localisation d'une bioraffinerie constitue une étape stratégique déterminante, car elle influence directement la rentabilité, la durabilité et la compétitivité du projet. Un emplacement optimal permet de réduire les coûts logistiques liés à l'approvisionnement en biomasse et à la distribution des produits finis, tout en garantissant une meilleure accessibilité aux marchés et en limitant l'impact environnemental. Dans ce cadre, plusieurs recherches se sont intéressées à la conception de nouveaux réseaux de production de bioénergie et de biocarburants issus de la biomasse. L'un des principaux objectifs de ces travaux est la localisation optimale des bioraffineries, qu'il s'agisse des sites de production, des fournisseurs ou encore des centres de distribution [131].

Dix pôles de demande de biogaz ont été recensés à travers différentes régions d'Algérie, notamment : Sétif, Alger, Tizi-Ouzou, Blida, Constantine, M'sila, Guelma, Béjaïa, Oran et Djelfa. Ces localisations constituent les principaux centres de consommation de biogaz. En complément, quatre sites ont été retenus comme candidats pour l'implantation de la bioraffinerie, à savoir : Médéa, Bouira, Batna et Bordj Bou Arréridj.

ID	Points de demande	ID	Points condidats
1	Sétif	01	Media
2	Alger		
3	Tizi-ouzou	02	Bouira
4	Blida		
5	Constontine	03	Batna
6	M'sila		
7	Guelma	04	Bordj bou Arréridj
8	Béjaia		
9	Oran		
10	Djelfa		

Tab. 3.1: Points de consommation de biogaz et sites candidats pour l'implantation d'une bioraffinerie

Les points de demande de biogaz, ainsi que les sites candidats pour l'implantation d'une bioraffinerie, ont été intégrés dans QGIS afin de permettre leur visualisation et leur analyse spatiale. Cette étape a pour objectif de représenter leur répartition géographique, d'évaluer leur accessibilité et d'analyser différentes alternatives en vue de déterminer l'implantation optimale de la bioraffinerie.

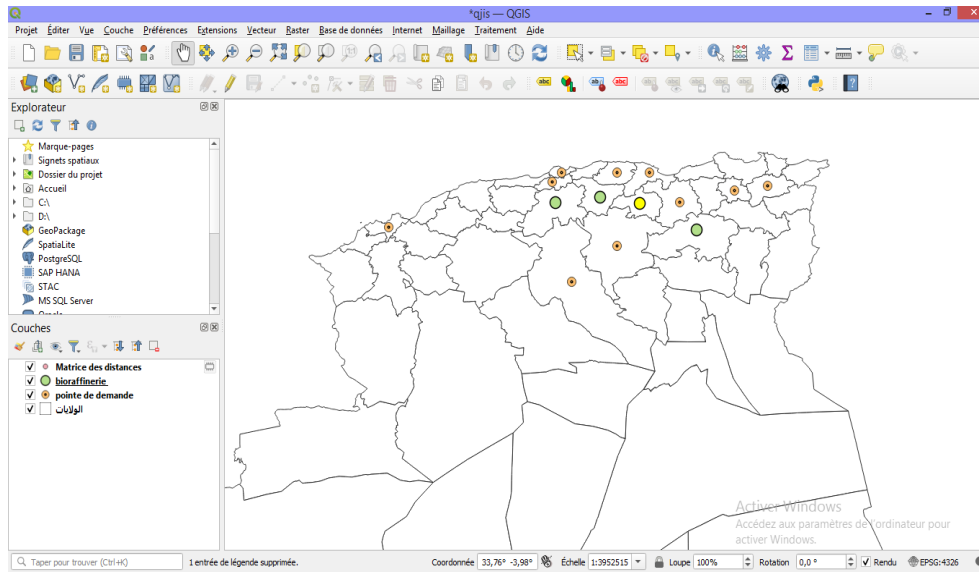


Fig. 3.1: Intégration des points de demande et des sites candidats dans QGIS  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

## Modele formulation

### Paramètres

**d<sub>ij</sub>** : Distance de desserte entre le points de demande i et le centre candidat j.

**p** : Nombre total de bioraffineries à implanter.

### Variables de décision

**x<sub>ij</sub>** : Variable binaire, égale à 1 si point de demande i est attribué au point candidat j, et 0 sinon.

**y<sub>j</sub>** : variable binaire, égale à 1 si le site candidat j est sélectionné pour l'implantation de la bioraffinerie, et 0 sinon

## Fonction objectif

La fonction objectif (1) du modèle proposé vise à minimiser la distance totale de transport entre les points de demande et les sites candidats retenus pour l'implantation de la bioraffinerie. Elle est exprimée comme la somme des distances  $d_{i,j}$  multipliées par la variable binaire  $x_{i,j}$ , qui indique si le point de demande i est rattaché au site j. Ainsi, le modèle cherche à réduire au maximum les coûts logistiques tout en optimisant l'affectation des points de demande aux bioraffineries implantées.

$$\min \sum_i \sum_j d_{i,j} \cdot X_{i,j} \quad (1)$$

## Contraintes

Les contraintes du modèle s'énoncent comme suit. Tout d'abord, chaque point de demande  $i$  doit être affecté exactement à un et un seul centre  $j$ , ce qui est assuré par la contrainte (2) Ensuite, la contrainte (3) garantit qu'un point de demande ne peut être attribué qu'à un centre effectivement ouvert. Par ailleurs, la contrainte (4) impose que Le nombre total de bioraffineries implantées doit être exactement égal à  $p$ . Enfin, les contraintes d'intégrité(5) définissent la nature binaire des variables de décision

$$\sum_j X_{i,j} = 1, \quad \forall i \quad (2)$$

$$X_{i,j} \leq Y_j, \quad \forall i, \forall j \quad (3)$$

$$\sum_j Y_j = p \quad (4)$$

$$X_{i,j} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall j \quad (5)$$

$$Y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \quad (5)$$

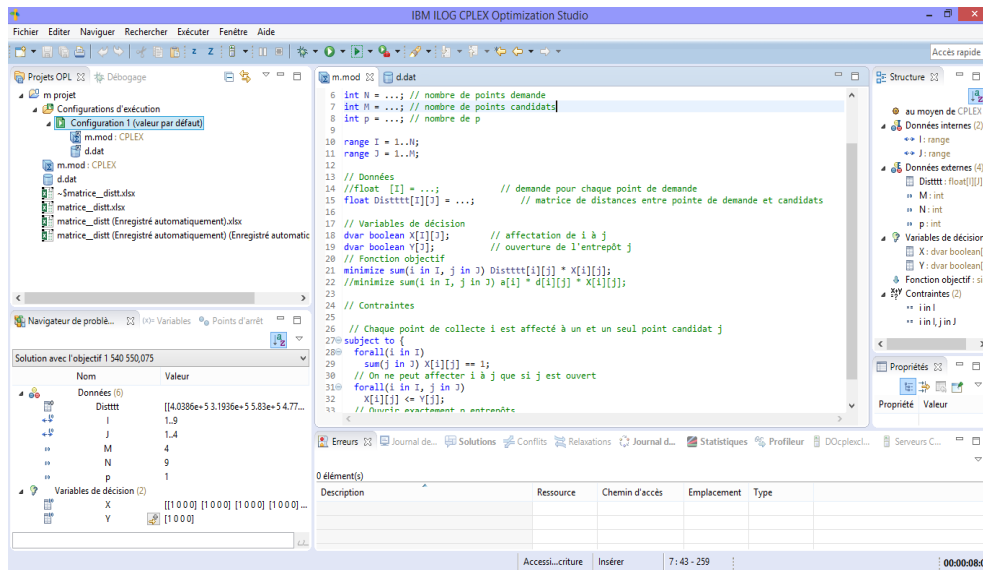


Fig. 3.2: Résultats de la formulation du modèle sous CPLEX  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

La formulation mathématique du modèle a été intégrée dans le solveur IBM ILOG CPLEX afin de permettre sa résolution. Cette étape a consisté à traduire les variables de décision, la fonction objectif ainsi que l'ensemble des contraintes du modèle sous un format compatible avec l'optimiseur. L'utilisation de CPLEX a ainsi permis d'obtenir une solution optimale répondant au problème d'implantation étudié.

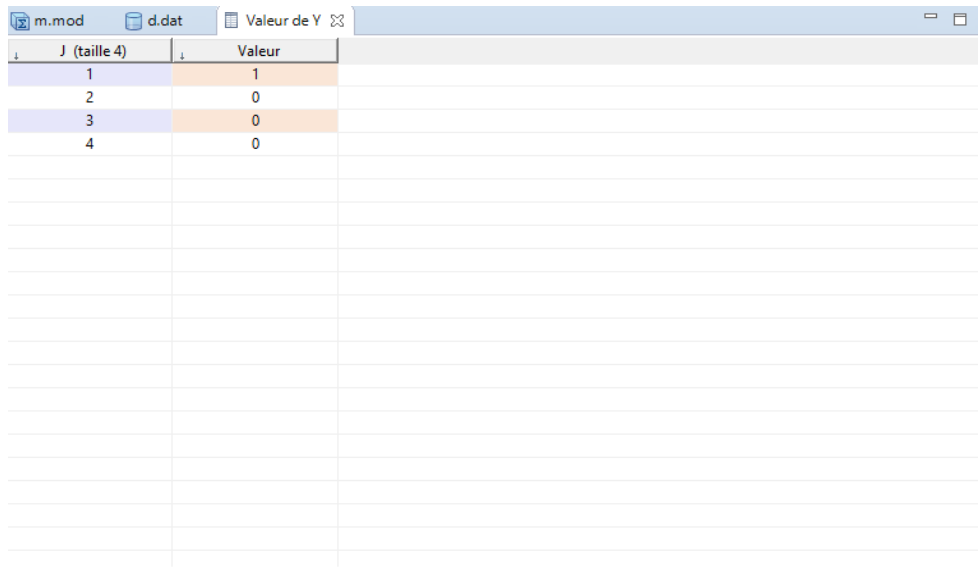
```
m.mod d.dat
1 /*****
2 * OPL 12.8.0.0 Data
3 * Author: ACER
4 * Creation Date: 10 août 2025 at 17:25:04
5 *****/
6 N= 9;
7 M= 4;
8 p=1;
9 SheetConnection excelsheet("matrice_distt.xlsx");
10 Distttt from SheetRead(excelsheet,"matrice_distt!B2:J5");
11 //x to SheetWrite(excelsheet,"Feuill1!B17:U25");
12
13
14
```

Fig. 3.3: Résultats de la formulation du modèle sous CPLEX  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

	1	2	3	4
1	0	403858.44	319364.35	683001.08
2	188527.65	172473.29	269544.78	477182.82
3	317219.17	401628.92	164246.57	244100.38
4	107644.55	189393.73	141769.96	66635.59

Fig. 3.4: Extraction de la matrice des distances sous Excel  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

La matrice de distance a été élaborée et intégrée à l'aide d'Excel afin de représenter les distances entre les différents points étudiés. Cette étape a permis de structurer les données nécessaires à la modélisation et de fournir une base fiable pour l'optimisation dans le cadre du problème d'implantation de la bioraffinerie.



J (taille 4)	Valeur
1	1
2	0
3	0
4	0

Fig. 3.5: Résultats finaux de l'implantation obtenus sous CPLEX  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

À la suite des résultats obtenus via CPLEX, l'implantation optimale du bioraffinerie a été déterminée. L'analyse a montré que le site le plus adapté correspond au 1<sup>er</sup> point candidat, situé à Bouira. Afin de mieux visualiser et analyser cette solution, le résultat a ensuite été intégré dans QGIS, ce qui a permis de représenter géographiquement de la bioraffinerie. retenu ainsi que sa relation avec les autres points du réseau

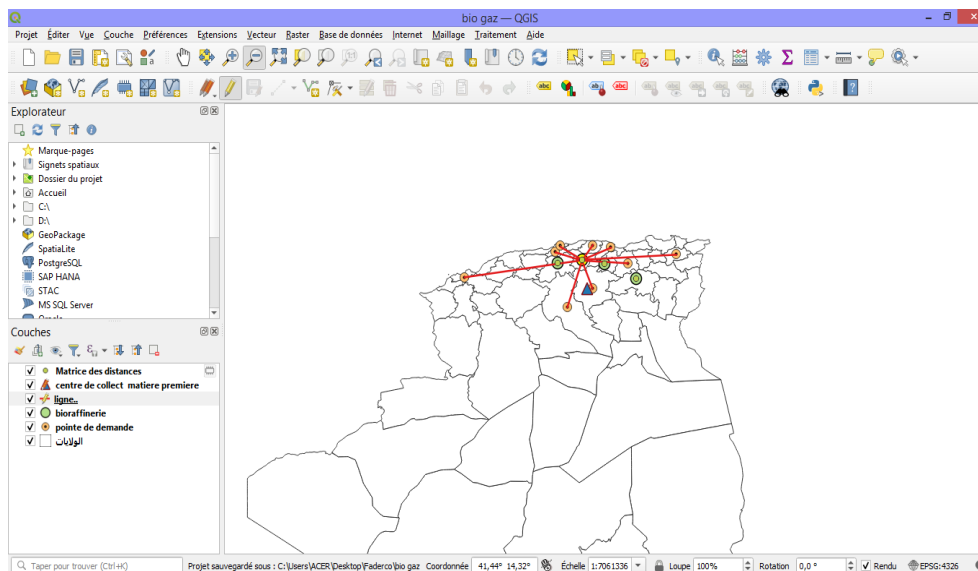


Fig. 3.6: Localisation optimale représentée sur QGIS  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

### 3.3 Étude du problème d'implantation de la bioraffinerie de biethanol

La localisation d'une bioraffinerie représente une décision stratégique majeure, car elle conditionne directement la rentabilité, la durabilité ainsi que la compétitivité du projet. Le choix d'un emplacement optimal permet de réduire les coûts logistiques liés à l'approvisionnement en biomasse et à la distribution des produits finis, tout en améliorant l'accessibilité aux marchés et en minimisant l'impact environnemental. Dans cette perspective, plusieurs travaux de recherche se sont consacrés à la conception de réseaux de production de bioénergie et de biocarburants issus de la biomasse. L'un des enjeux essentiels de ces études réside dans la détermination de la localisation optimale des bioraffineries, qu'il s'agisse des sites de production, des fournisseurs ou des centres de distribution [131].

Un total de dix-neuf pôles de demande de bioéthanol ont été identifiés à travers différentes régions d'Algérie, parmi lesquels figurent : Alger, Sétif, Tlemcen, Blida, Constantine, Cherchell, Médéa, Béjaïa, Oran, Annaba, Tizi Ouzou, El Tarf, Oum El Bouaghi, Sidi Bel Abbès, Jijel, El Oued, Bordj Bou Arréridj et Batna. Ces localisations représentent les principaux centres de consommation de biogaz. Parallèlement, quatre sites ont été sélectionnés comme emplacements potentiels pour l'implantation d'une bioraffinerie, à savoir : Médéa, Tissemsilt, Relizane et Bouira.

ID	Points de demande	ID	Points condidats
1	Sétif	01	Media
2	Alger		
3	Tlemcen	02	Tissemsilt
4	Blida		
5	Constontine	03	Rélizane
6	Cherchell		
7	Médéa	04	Ain Defla
8	Béjaia		
9	Oran	05	Bouira
10	Annaba		
11	Tizi Ouzou		
12	El Tarf		
13	Oum El Boua-ghi		
14	Sidi Bel Abbès		
15	Jijel		
16	El Oued		
17	Bordj Bou Arréridj		
18	Batna		

Tab. 3.2: Points de consommation de bioethanol et sites candidats pour l'implantation d'une bioraffinerie

Les points de demande de bioéthanol, ainsi que les sites candidats pour l'implantation d'une bioraffinerie, ont été intégrés dans QGIS afin de permettre leur visualisation et leur analyse spatiale. Cette étape a pour objectif de représenter leur répartition géographique, d'évaluer leur accessibilité et d'analyser différentes alternatives en vue de déterminer l'implantation optimale de la bioraffinerie.

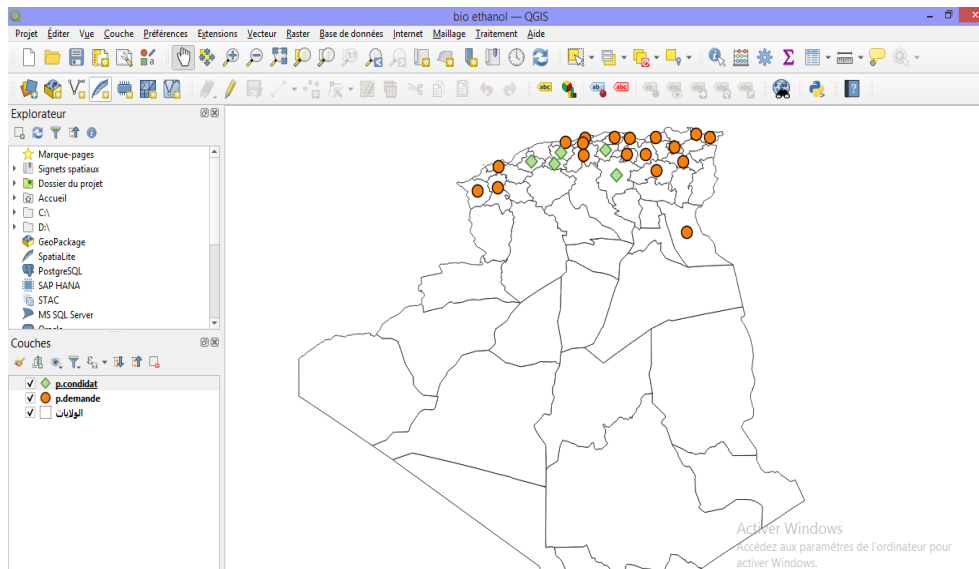


Fig. 3.7: Intégration des points de demande et des sites candidats dans QGIS  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

### Modele formulation

#### Paramètres

**dij** : Distance de desserte entre le points de demande  $i$  et le centre candidat  $j$ .

**p** : Nombre total de bioraffineries à implanter.

#### Variables de décision

**xij** : Variable binaire, égale à 1 si point de demande  $i$  est attribué au point candidat  $j$ , et 0 sinon.

**yj** : variable binaire, égale à 1 si le site candidat  $j$  est sélectionné pour l'implantation de la bioraffinerie, et 0 sinon

### Fonction objectif

La fonction objectif (1) du modèle proposé vise à minimiser la distance totale de transport entre les points de demande et les sites candidats retenus pour l'implantation de la bioraffinerie. Elle est exprimée comme la somme des distances  $d_{ij}$  multipliées par la variable binaire  $x_{ij}$ , qui indique si le point de demande  $i$  est rattaché au site  $j$ . Ainsi, le modèle cherche à réduire au maximum les coûts logistiques tout en optimisant l'affectation des points de demande aux bioraffineries implantées.

$$\min \sum_i \sum_j d_{i,j} \cdot X_{i,j} \quad (1)$$

## Contraintes

Les contraintes du modèle s'énoncent comme suit. Tout d'abord, chaque point de demande  $i$  doit être affecté exactement à un et un seul centre  $j$ , ce qui est assuré par la contrainte (2) Ensuite, la contrainte (3) garantit qu'un point de demande ne peut être attribué qu'à un centre effectivement ouvert. Par ailleurs, la contrainte (4) impose que Le nombre total de bioraffineries implantées doit être exactement égal à  $p$ . Enfin, les contraintes d'intégrité(5) définissent la nature binaire des variables de décision

$$\sum_j X_{i,j} = 1, \quad \forall i \quad (2)$$

$$X_{i,j} \leq Y_j, \quad \forall i, \forall j \quad (3)$$

$$\sum_j Y_j = p \quad (4)$$

$$X_{i,j} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall j \quad (5)$$

$$Y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \quad (5)$$

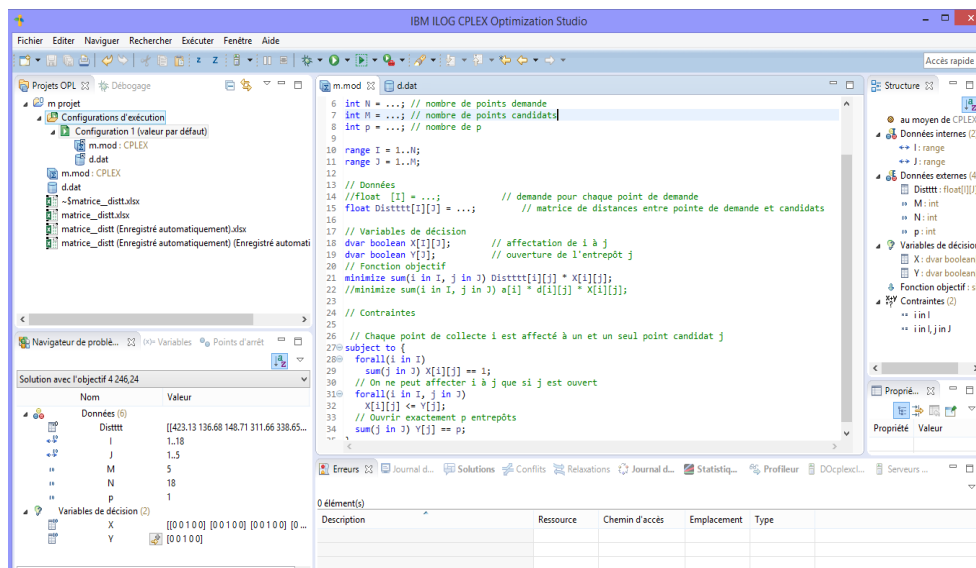


Fig. 3.8: Résultats de la formulation du modèle sous CPLEX  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

```
m.mod d.dat Valeur de Y
1 /*****
2 * OPL 12.8.0.0 Data
3 * Author: ACER
4 * Creation Date: 10 août 2025 at 17:25:04
5 *****/
6 N= 18;
7 M= 5;
8 p=1;
9 SheetConnection excelSheet("matrice_distt.xlsx");
10 Distttt from SheetRead(excelSheet,"matrice_distt!B3:S7");
11 //x to SheetWrite(excelSheet,"Feuil1!B17:U25");
12
13
14
```

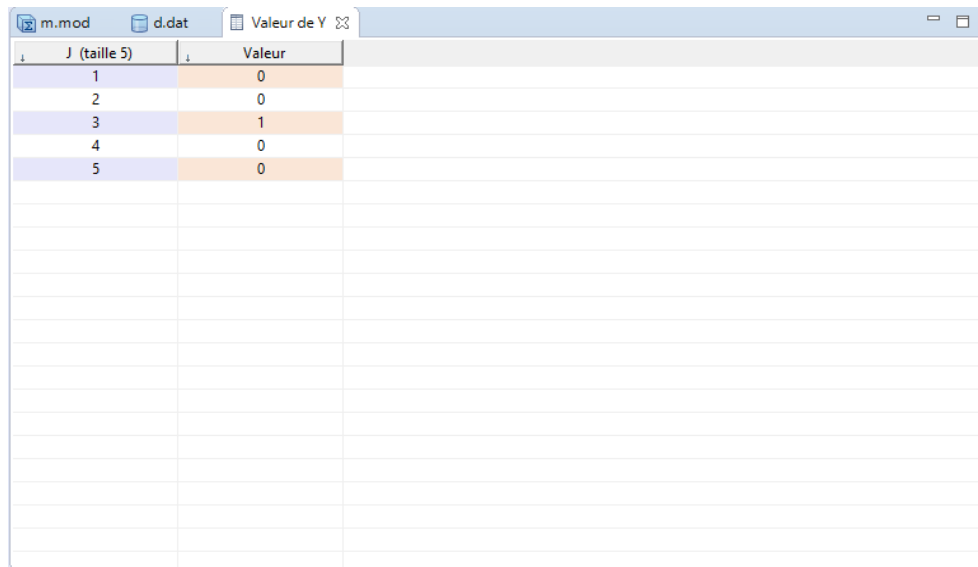
Fig. 3.9: Résultats de la formulation du modèle sous CPLEX  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

La formulation mathématique du modèle a été intégrée dans le solveur IBM ILOG CPLEX afin de permettre sa résolution. Cette étape a consisté à traduire les variables de décision, la fonction objectif ainsi que l'ensemble des contraintes du modèle sous un format compatible avec l'optimiseur. L'utilisation de CPLEX a ainsi permis d'obtenir une solution optimale répondant au problème d'implantation étudié.

	1	2	3	4	5
1					
2					
3	1	423.130000	218.130000	232.930000	202.590000
4	2	136.680000	189.010000	522.640000	178.150000
5	3	148.710000	91.140000	502.760000	88.490000
6	4	311.660000	104.590000	347.200000	87.250000
7	5	338.650000	152.460000	307.230000	132.530000

Fig. 3.10: Extraction de la matrice des distances sous Excel  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

La matrice de distance a été élaborée et intégrée à l'aide d'Excel afin de représenter les distances entre les différents points étudiés. Cette étape a permis de structurer les données nécessaires à la modélisation et de fournir une base fiable pour l'optimisation dans le cadre du problème d'implantation de la bioraffinerie.



J (taille 5)	Valeur
1	0
2	0
3	1
4	0
5	0

Fig. 3.11: Résultats finaux de l'implantation obtenus sous CPLEX  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

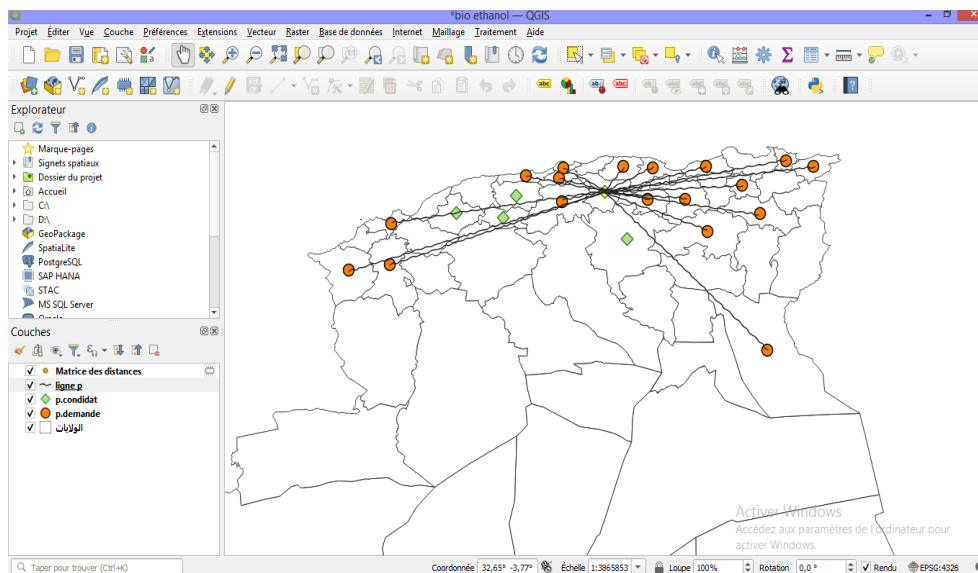


Fig. 3.12: Localisation optimale représentée sur QGIS  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

À la suite des résultats obtenus via CPLEX, l'implantation optimale du bioraffinerie a été déterminée. L'analyse a montré que le site le plus adapté correspond au 1<sup>er</sup> point candidat, situé à Bouira. Afin de mieux visualiser et analyser cette solution, le résultat a ensuite été intégré dans QGIS, ce qui a permis de représenter géographiquement de la bioraffinerie. retenu ainsi que sa relation avec les autres points du réseau

### 3.4 Étude du problème d'implantation de la bioraffinerie de Multi produit (biogaz, bioethanol)

Un ensemble de pôles de demande en biogaz et en bioéthanol a été identifié à travers plusieurs régions d'Algérie. Parmi les principaux centres de consommation recensés figurent : Alger, Sétif, Tizi-Ouzou, Blida, Constantine, M'sila, Guelma, Béjaïa, Oran, Djelfa, Tlemcen, Cherrhell, Médéa, Annaba, El Tarf, Oum El Bouaghi, Sidi Bel Abbès, Jijel, El Oued, Bordj Bou Arréridj et Batna. Ces localisations représentent les zones stratégiques de concentration de la demande en bioénergie.

Parallèlement, plusieurs sites ont été retenus comme candidats potentiels pour l'implantation d'une bioraffinerie, à savoir : Saïda, Tiaret, Relizane, Chlef, Aïn Defla, Bouira, Blida, Ouled Djellal et Mila.

ID	Points de demande	ID	Points condidats
1	M'sila	01	Mila
2	Sétif	02	Ouled Djellal
3	Tizi-ouzou		
4	Blida		
5	Constontine	03	Blida
6	M'sila	04	Aïn Defla
7	Guelma		
8	Béjaia	05	Relizane
9	Oran		
10	Djelfa		
11	Alger	06	Bouira
12	Tlemcen		
13	Cherrhell	07	Saïda
14	Médéa		
15	Oran	08	Chlef
16	Annaba		
17	El Tarf	09	Tiaret
18	Oum El Boua-ghi		
19	Sidi Bel Abbès		
20	Jijel		
21	El Oued		
22	Bordj Bou Arréridj		
23	Batna		

Tab. 3.3: Points de consommation de biogaz et sites candidats pour l'implantation d'une bioraffinerie

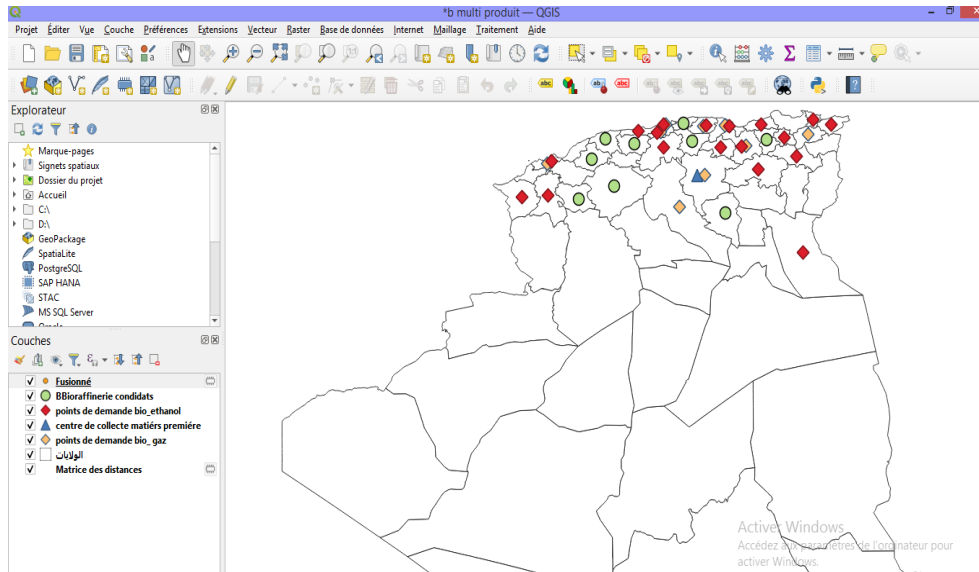


Fig. 3.13: Intégration des points de demande et des sites candidats dans QGIS  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

## Modele formulation

### Paramètres

**d<sub>ij</sub>** : Distance de desserte entre le points de demande i et le centre candidat j.

**p** : Nombre total de bioraffineries à planter.

### Variables de décision

**x<sub>ij</sub>** : Variable binaire, égale à 1 si point de demande i est attribué au point candidat j, et 0 sinon.

**y<sub>j</sub>** : variable binaire, égale à 1 si le site candidat j est sélectionné pour l'implantation de la bioraffinerie, et 0 sinon

## Fonction objectif

La fonction objectif (1) du modèle proposé vise à minimiser la distance totale de transport entre les points de demande et les sites candidats retenus pour l'implantation de la bioraffinerie. Elle est exprimée comme la somme des distances  $d_{ij}$  multipliées par la variable binaire  $x_{ij}$ , qui indique si le point de demande i est rattaché au site j. Ainsi, le modèle cherche à réduire au maximum les coûts logistiques tout en optimisant l'affectation des points de demande aux bioraffineries implantées.

$$\min \sum_i \sum_j d_{i,j} \cdot X_{i,j} \quad (1)$$

## Contraintes

Les contraintes du modèle s'énoncent comme suit. Tout d'abord, chaque point de demande  $i$  doit être affecté exactement à un et un seul centre  $j$ , ce qui est assuré par la contrainte (2) Ensuite, la contrainte (3) garantit qu'un point de demande ne peut être attribué qu'à un centre effectivement ouvert. Par ailleurs, la contrainte (4) impose que Le nombre total de bioraffineries implantées doit être exactement égal à  $p$ . Enfin, les contraintes d'intégrité(5) définissent la nature binaire des variables de décision

$$\sum_j X_{i,j} = 1, \quad \forall i \quad (2)$$

$$X_{i,j} \leq Y_j, \quad \forall i, \forall j \quad (3)$$

$$\sum_j Y_j = p \quad (4)$$

$$X_{i,j} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall j \quad (5)$$

$$Y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \quad (5)$$

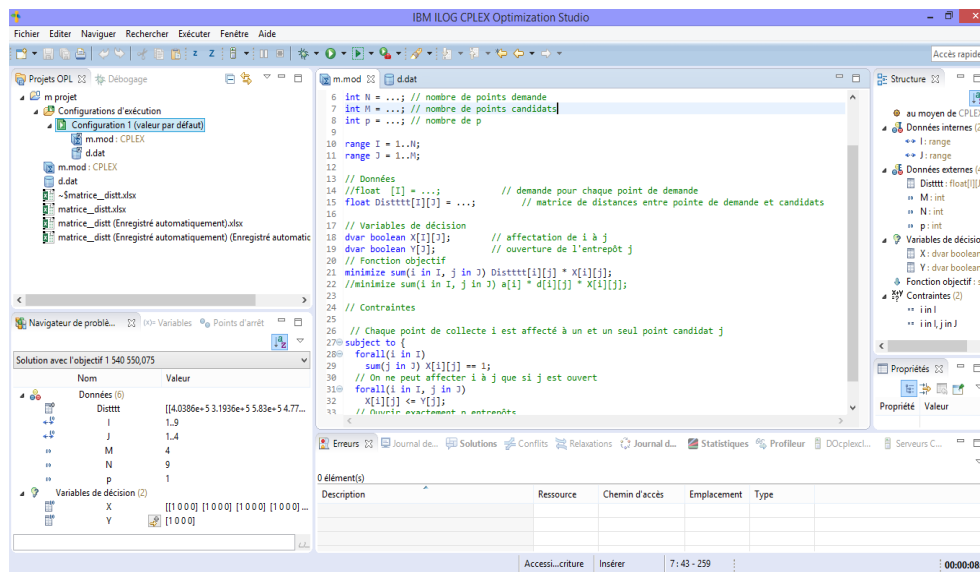


Fig. 3.14: Résultats de la formulation du modèle sous CPLEX  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

La formulation mathématique du modèle a été intégrée dans le solveur IBM ILOG CPLEX afin de permettre sa résolution. Cette étape a consisté à traduire les variables de décision, la fonction objectif ainsi que l'ensemble des contraintes du modèle sous un format compatible avec l'optimiseur. L'utilisation de CPLEX a ainsi permis d'obtenir une solution optimale répondant au problème d'implantation étudié.

```

1 /*****
2 * OPL 12.8.0.0 Data
3 * Author: ACER
4 * Creation Date: 10 août 2025 at 17:25:04
5 *****/
6
7
8 N= 27;
9 M= 9;
10 p=1;
11 SheetConnection excelsheet("matrice_distt.xlsx");
12 Distttt from SheetRead(excelsheet,"matrice_distt;Z35:AH61");
13 //x to SheetWrite(excelsheet,"Feuil1!B17:U25");
14

```

Fig. 3.15: Résultats de la formulation du modèle sous CPLEX  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

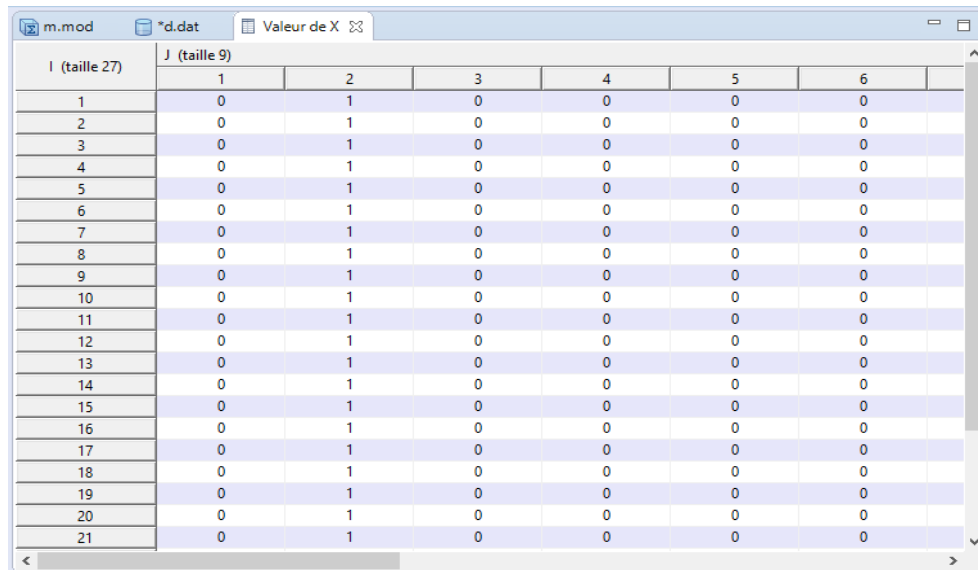
	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
33											
34											
35											
36											
37											
38											
39											
40											
41											
42											
43											
44											
45											
46											
47											
48											
49											
50											
51											
52											
53											
54											
55											
56											
57											
58											
59											
60											

Fig. 3.16: Extraction de la matrice des distances sous Excel  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

La matrice de distance a été élaborée et intégrée à l'aide d'Excel afin de représenter les distances entre les différents points étudiés. Cette étape a permis de structurer les données nécessaires à la modélisation et de fournir une base fiable pour l'optimisation dans le cadre du problème d'implantation de la bioraffinerie.

À la suite des résultats obtenus via CPLEX, l'implantation optimale de la bioraffinerie a été déterminée. L'analyse a montré que le site le plus adapté correspond au 2ème point candidat, situé à Bouira. Afin de mieux visualiser et analyser cette solution, le résultat a ensuite été intégré

dans QGIS, ce qui a permis de représenter géographiquement de la bioraffinerie. retenu ainsi que sa relation avec les autres points du réseau



I (taille 27)	J (taille 9)					
	1	2	3	4	5	6
1	0	1	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0
6	0	1	0	0	0	0
7	0	1	0	0	0	0
8	0	1	0	0	0	0
9	0	1	0	0	0	0
10	0	1	0	0	0	0
11	0	1	0	0	0	0
12	0	1	0	0	0	0
13	0	1	0	0	0	0
14	0	1	0	0	0	0
15	0	1	0	0	0	0
16	0	1	0	0	0	0
17	0	1	0	0	0	0
18	0	1	0	0	0	0
19	0	1	0	0	0	0
20	0	1	0	0	0	0
21	0	1	0	0	0	0

Fig. 3.17: Résultats finaux de l'implantation obtenus sous CPLEX  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

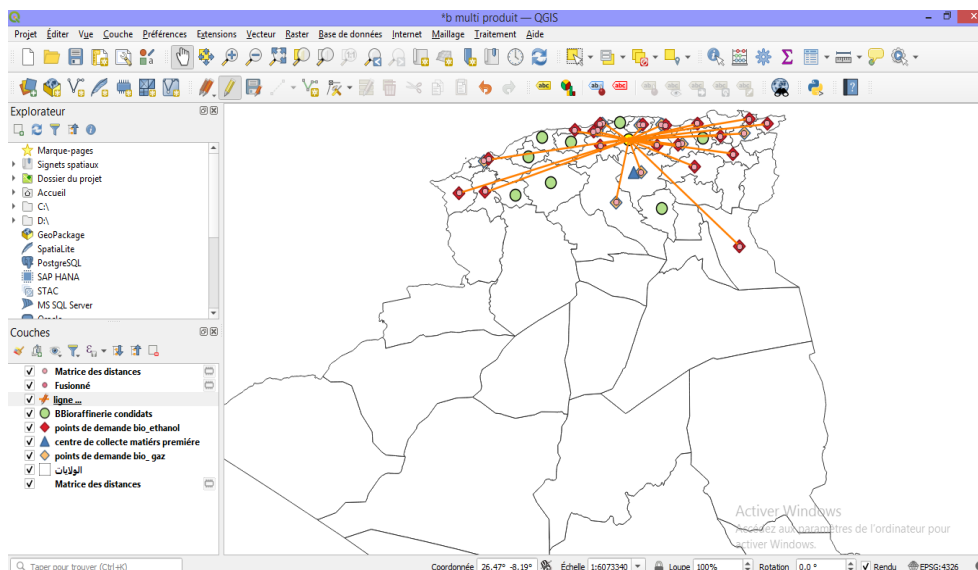


Fig. 3.18: Localisation optimale représentée sur QGIS  
(Source : réalisation personnelle, 2025)

### **3.5 Conclusion**

En résumé, ce chapitre a permis d'analyser la localisation optimale des centres de bioraffinerie, ainsi que la production et la distribution des différentes filières de valorisation de la biomasse, incluant le biogaz, le biocarburant et les produits multi-filières. L'étude a démontré que le choix stratégique des emplacements des centres de production influence directement l'efficacité logistique, la disponibilité des matières premières et, par conséquent, la rentabilité globale du système.

Par ailleurs, l'optimisation des flux de biomasse et la planification de la production ont montré leur rôle déterminant dans la maximisation du profit de la bioraffinerie. La valorisation simultanée des différents produits issus de la biomasse, ainsi que la gestion équilibrée des stocks et des ventes, constituent des leviers essentiels pour assurer la performance économique et la durabilité du système.

Ainsi, les résultats obtenus confirment que l'intégration d'une approche globale combinant localisation optimale, planification multi-produits et maximisation du profit permet de concevoir un modèle de bioraffinerie à la fois rentable et efficient, capable de répondre aux besoins énergétiques tout en valorisant les sous-produits et en limitant les pertes de ressources.

# CONCLUSION GÉNÉRAL

En conclusion, ce travail a permis de développer une approche intégrée pour la valorisation énergétique des résidus de palmiers dattiers à travers la conception et l'optimisation d'une chaîne logistique de bioraffinerie. L'étude a combiné l'analyse du potentiel de biomasse, la planification des flux logistiques et l'optimisation de la localisation des installations afin de maximiser la rentabilité et l'efficacité du système.

Les résultats montrent que la mise en place d'un réseau logistique optimisé, incluant des centres de stockage stratégiquement positionnés et une bioraffinerie centralisée, contribue à réduire les coûts de transport, à améliorer l'efficacité énergétique et à valoriser de manière durable les déchets agricoles. Par ailleurs, la production simultanée de biocarburants tels que le bioéthanol et le biogaz, ainsi que la valorisation des sous-produits, permet d'atteindre un profit maximal tout en répondant aux besoins énergétiques locaux.

Ainsi, ce mémoire illustre que l'intégration d'une démarche économique, énergétique et environnementale dans la planification et la gestion d'une bioraffinerie constitue un levier stratégique pour le développement durable. Les résultats obtenus peuvent servir de référence pour la mise en œuvre de projets similaires dans d'autres régions productrices de biomasse, contribuant à la transition énergétique et à la promotion d'une économie circulaire.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Khaled Ghedira, *La logistique de la production : approches de modélisation et de résolution*, Éditions Technip, 2006, 116 pages. 7
- [2] Barbara Lyonnet, Marie-Pascale Senkel, *La logistique*, Éditions Paris, 2005, pages 9-10. 8
- [3] Anne Gratacap, Pierre Medan, *Logistique et Supply Chain Management : intégration, collaboration et risque dans la chaîne logistique globale*, Dunod, 2006, page 19. 9
- [4] Hanane Mansouri, Souad Mazouzi, *Minimisation des coûts logistiques de distribution des centres de livraison régionaux aux grossistes*, mémoire de master recherche, Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2016, page 8. 10
- [5] Supply Chain Council, *Supply Chain Operations Reference (SCOR) Model*, Version 3.0, 1997. 11
- [6] J.M. Swaminathan, S.F. Smith, and N.M. Sadeh, *Modeling supply chain dynamics : A multiagent approach*, Decision Sciences, vol. 27, no. 4, 1996, pp. 689–719. 11
- [7] S. Tayur, R. Ganeshan, and M. Magazine, *Quantitative Models for Supply Chain Management*, Kluwer Academic Publishers, 1999. 11
- [8] J.T. Mentzer, W. DeWitt, J.S. Keebler, S. Min, N.W. Nix, C.D. Smith, and Z.G. Zacharia, *Defining supply chain management*, Journal of Business Logistics, vol. 22, no. 2, 2001, pp. 1–25. 11
- [9] H. Génin, *La gestion de la chaîne logistique : vers un management inter-organisationnel*, Revue Française de Gestion, vol. 29, no. 147, 2003, pp. 141–158. 11
- [10] H. Stadtler and C. Kilger (eds.), *Supply Chain Management and Advanced Planning : Concepts, Models, Software and Case Studies*, Springer, 2000. 11
- [11] H.L. Lee and C. Billington, *The evolution of supply-chain-management models and practice at Hewlett-Packard*, Interfaces, vol. 25, no. 5, 1995, pp. 42–63. 11

- [12] Jaouher Mahmoudi, *Simulation et gestion des risques en planification distribuée de chaînes logistiques : application au secteur de l'électronique et des télécommunications*, thèse de doctorat en logistique, 2006, page 56. 11
- [13] A. Mahmoudi, *La gestion de la chaîne logistique : concepts, modèles et outils*, Revue des Sciences de Gestion, vol. 41, no. 219, 2006, pp. 105–118. 13, 17
- [14] K. Alexandre, *Stratégie logistique : Supply Chain Management*, 3<sup>e</sup> édition, Dunod, Paris, 2004, page 19. 12
- [15] Salah Eddin Merzouk, *Problème de dimensionnement de lot et de livraison : application au cas d'une chaîne logistique*, thèse de doctorat en automatique et informatique, Université de Technologie de Belfort, 2007, page 14. 14
- [16] M. Julien Français, *Planification des chaînes logistiques : modélisation du système décisionnel et performance*, thèse de doctorat en productique, Université Bordeaux 1, 2007, page 33. 14
- [17] Solatatech, *Solutions logicielles pour la gestion de la chaîne logistique*, [en ligne], disponible sur : <https://www.solatatech.com>, consulté le 18 avril 2025. 14
- [18] M. Julien François, *Planification des chaînes logistiques : modélisation du système décisionnel et performance*, thèse de doctorat en productique, 2007, pages 23-24. 15
- [19] Pierre Medan, Anne Gratacap, *Logistique et Supply Chain Management : intégration, collaboration et risque dans la chaîne logistique globale*, Dunod, 2006, page 15.
- [20] Christophe Guoin, *Modélisation et résolution de problèmes de planification de la chaîne logistique à l'aide du logiciel d'optimisation AIMMS*, [Éditeur], 2011, page 84.
- [21] A. Marchel, *Logistique globale*, Ellipses, Édition Marketing S.A, 2006, page 31.
- [22] CAT Logistique, *Optimisation*, disponible en ligne : <http://www.cat-logistique.com/optimisation.htm>, consulté le 10 avril 2017.
- [23] Mouloua Zerouk, *Ordonnancements coopératifs pour les chaînes logistiques*, thèse de doctorat en informatique, Université de Lorraine, 2007, pages 14-17.
- [24] Ali Mehrabikoushki, *Partage d'information dans la chaîne logistique*, thèse de doctorat en génie informatique, Institut des Sciences Appliquées de Lyon, 2008, page 23.
- [25] M-Julien Français, *Planification des chaînes logistiques : modélisation du système décisionnel et performance*, thèse de doctorat en productique, Université Bordeaux 1, 2007, page 19.
- [26] B.D. Solomon, J.R. Barnes, and K.E. Halvorsen, *Grain and cellulosic ethanol : History, economics, and energy policy*, Biomass and Bioenergy, vol. 31, no. 6, 2007, pp. 416–425. 17

- [27] F. Cherubini, *The biorefinery concept : Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals*, Energy Conversion and Management, vol. 51, no. 7, 2010, pp. 1412–1421. 17
- [28] United States Department of Energy, *Bioraffinage*, Département de l'Énergie des États-Unis, 2025, disponible sur : <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/biorefineries> [Consulté le 1er avril 2025]. 17
- [29] M. Marinova, E. Mateos-Espejel, B. Bakhtiari, J. Paris, *A new methodology for the implementation of trigeneration in industry : application to the process*, in : *Proceedings of the First European Conference on Polygener Technologies and Application*, Tarragona, Spain, 2007, pp. 333-351. 17
- [30] M. Marinova, E. Mateos-Espejel, N. Jemaa, J. Paris, *Addressing the increased energy demand of a Kraft mill biorefinery : the hemicellulose extraction case*, Chem. Eng. Res. Des. 87 (9) (2009) 1269-1275. 18
- [31] M. Marinova, E. Mateos-Espejel, J. Paris, *From Kraft mills to forest biorefinery : an energy and water perspective. II. Case study*, Cellul. Chem. Technol. 44 (1) (2010) 21. 18
- [32] M. Kamm and B. Kamm, *Principles of biorefineries*, Applied Microbiology and Biotechnology, vol. 64, no. 2, 2004, pp. 137–145. 19
- [33] E. Reguly, *The great fuel debate : Food vs. biofuels*, The Globe and Mail, 2009. [En ligne]. Disponible : <https://www.theglobeandmail.com> 19
- [34] Michigan State University, *Biofuel production and the food crisis*, MSU Extension Bulletin, 2010. [En ligne]. Disponible : <https://www.canr.msu.edu> 19
- [35] T. Searchinger, R. Heimlich, R.A. Houghton, F. Dong, A. Elobeid, J. Fabiosa, S. Tokgoz, D. Hayes, T.H. Yu, *Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change*, Science, 319(5867), 1238–1240, 2008. 19
- [36] J. Fargione, J. Hill, D. Tilman, S. Polasky, P. Hawthorne, *Land clearing and the biofuel carbon debt*, Science, 319(5867), 1235–1238, 2008. 19
- [37] Bio Intelligence Service, *Environmental impact of products (EIPRO) : Analysis of the life cycle environmental impacts related to the total final consumption of the EU-25*, European Commission – DG JRC, 2010. 19
- [38] B. Kamm, M. Kamm, *Principles of biorefineries*, Applied Microbiology and Biotechnology, 64(2), 137–145, 2004. 19, 20
- [39] Rainer Mandl, *Les bioraffineries vertes : principes et applications*, Éditions Nom de l'éditeur, 2010, XX pages. 20
- [40] Kamm, B., et al., *Les bioraffineries céréalières : principes et applications*, Éditions Nom de l'éditeur, 2007a, 592-603.

- [41] Kumar, R., et al., *Bioraffineries lignocellulosiques : Transformation et applications*, Éditions Nom de l'éditeur, 2009a, 1-24. 20
- [42] A. Demirbas, *Political, economic and environmental impacts of biofuels : A review*, Applied Energy, 86 (Supplement 1), 2009, pp. S108–S117.
- [43] S.N. Naik, V.V. Goud, P.K. Rout, A.K. Dalai, *Production of first and second generation biofuels : A comprehensive review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14 (2), 2010, pp. 578–597.
- [44] J.P. Didden, M.J.A.T. Linders, E.J. Vandijk, *Biorefineries for the chemical industry : A Dutch point of view*, Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2 (3), 2008, pp. 276–284.
- [45] J. Zaldivar, J. Nielsen, L. Olsson, *Fuel ethanol production from lignocellulose : a challenge for metabolic engineering and process integration*, Applied Microbiology and Biotechnology, 56 (1–2), 2001, pp. 17–34.
- [46] S. Lestari, P. Mäki-Arvela, J. Beltramini, G.Q. Lu, D.Y. Murzin, *Transformation of biomass-derived carbohydrates into hydrogen and alkanes via aqueous-phase reforming and gasification : A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13 (4), 2009, pp. 594–604.
- [47] C.L. Williams, C.W. Chang, P. Do, N. Nikbin, S. Caratzoulas, D.G. Vlachos, R.F. Lobo, W. Fan, P.J. Dauenhauer, *Cycloaddition of biomass-derived furans for catalytic production of renewable p-xylene*, ACS Catalysis, 2 (6), 2009, pp. 935–939. 21
- [48] Techniques de l'Ingénieur, *Les biocarburants de troisième génération*, 30 septembre 2009. Disponible sur : [http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/environnement-securite-energie-thematique\\_191/les-biocarburants-de-troisieme-generation-article\\_6323](http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/environnement-securite-energie-thematique_191/les-biocarburants-de-troisieme-generation-article_6323). 22
- [49] B. Kamm, M. Kamm, *Biorefineries – Multi Product Processes*, Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology, vol. 105, 2007, pp. 175–204. 22, 23
- [50] J.H. Shim, Y.B. Lee, S.H. Kim, *Third generation biofuels : Introduction to algae and its applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, 2018, pp. 1477–1487. 22, 23
- [51] Z. Yang, *Recent advances in third-generation biofuels : Algae-based biorefineries*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 158, 2022, 112132. 22
- [52] B. Kamm, M. Kamm, P.R. Gruber, S. Kromus, *Integrated biorefineries – a sustainable approach to biomass utilization*, Industrial Biotechnology, vol. 17, no. 1, 2021, pp. 12–26. 22, 23
- [53] J.H. Shim, Y.B. Lee, S.H. Kim, *Third generation biofuels : Introduction to algae and its applications*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, 2018, pp. 1477–1487. 22, 23

- [54] B. Kamm, M. Kamm, P.R. Gruber, S. Kromus, *Integrated biorefineries – a sustainable approach to biomass utilization*, *Industrial Biotechnology*, vol. 17, no. 1, 2021, pp. 12–26. 22, 23
- [55] *Biorefinery*, 2023. Available at : <https://www.example.com>. 23
- [56] B. Kamm, M. Kamm, P.R. Gruber, S. Kromus, *Integrated biorefineries – a sustainable approach to biomass utilization*, *Industrial Biotechnology*, vol. 17, no. 1, 2021, pp. 12–26. 22, 23
- [57] B. Kamm, M. Kamm, *Biorefineries – Multi Product Processes*, *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, vol. 105, 2007, pp. 175–204. 22, 23
- [58] V. Chaturvedi, P. Verma, R. Verma, *Third generation biofuels : A review on algae-based bioethanol production*, *Materials Today : Proceedings*, vol. 41, 2020, pp. 661–667. 23
- [59] *Biorefinery*, 2023. Disponible sur : <https://www.example.com>. 23
- [60] S. Noreen, M. Maqbool, M. Saleem, *Bioethanol production from renewable sources : Current perspectives and technological advancements*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 72, 2017, pp. 834–842. 23
- [61] U.S. Congress, *Biomass Research and Development Act of 2000*, Title III of the Agricultural Risk Protection Act of 2000, Public Law 106-224, 2000.
- [62] D. Bradley, *Biomass distribution and potential in the United States*, *Biomass Magazine*, 2006.
- [63] F. Cherubini, *The biorefinery concept : Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals*, *Energy Conversion and Management*, vol. 51, no. 7, 2010, pp. 1412–1421.
- [64] R.D. Perlack, L.L. Wright, A.F. Turhollow, R.L. Graham, B.J. Stokes, D.C. Erbach, *Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry : The technical feasibility of a billion-ton annual supply*, U.S. Department of Energy and U.S. Department of Agriculture, 2005.
- [65] J.S. Tumuluru, *Biomass preprocessing and pretreatment for production of biofuels*, in *Biomass, Biofuels, Biochemicals : Biofuels*, Elsevier, 2020, pp. 113–140. 27
- [66] R. Santhakumari, M. Arunkumar, P. Shanmugam, *Recent trends in algae-based biofuel production : Third-generation biofuels*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 177, 2024, 113213. 27
- [67] D. Fantini, *Advanced biorefineries : Future perspectives for a sustainable bioeconomy*, *Industrial Crops and Products*, vol. 99, 2017, pp. 197–204. 27, 30
- [68] D. Fantini, *Advanced biorefineries : Future perspectives for a sustainable bioeconomy*, *Industrial Crops and Products*, vol. 99, 2017, pp. 197–204. 27, 30

- [69] C. E. Lascano, M. C. Ramirez, and A. Torres, *Title of the article*, Journal Name, vol. XX, 2021, pp. xxx–xxx. 30
- [70] Y. Sun, X. Li, and T. Zhang, *Title of the article*, Journal Name, vol. XX, 2024, pp. xxx–xxx. 31
- [71] M. Szarzanowicz, A. Nowak, and L. Kowalski, *Title of the article*, Journal Name, vol. XX, 2024, pp. xxx–xxx. 31
- [72] M. Buelguedj, *Évaluation du sous-secteur des dattes en Algérie*, INRAA El Harrach, 2007. 33
- [73] F. Cheniti, *Titre du document*, 2014.
- [74] F. Cheiakh, *Titre du document*, 2018. 34
- [75] E. Pongracz, *Titre du document*, 2002. 34
- [76] R. Hakkou and M. Bouakka, *Titre du document*, 2000. 35
- [77] A. Almi, et al., *Titre du document*, 2015. 36
- [78] A. Zaid et P.F. de Wet, *Date Palm Cultivation*, FAO Plant Production and Protection Paper 156 Rev.1, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), 2002. 38, 40, 41
- [79] P. Munier, *Le palmier dattier*, Maisonneuve & Larose, Paris, 1973. 38
- [80] A. Zaid et P.F. de Wet, *Date Palm Cultivation*, FAO Plant Production and Protection Paper 156 Rev.1, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), 2002. 38, 40, 41
- [81] A. Slimane and B. Sali, *Caractérisation et quantification des déchets du palmier dattier dans la région d'Adrar*, Mémoire de Master, 2019. 40
- [82] A. El Hadrami and I. El Hadrami, *Titre du document*, 2009. 40
- [83] S. Meradi, N. Dakhia et M. Aouachria, *Déchets de palmeraie : alternative alimentaire du cheptel prometteuse en régions arides Algérie*, Livestock Research for Rural Development, vol. 28, article 163, 2016. 40
- [84] R. Brousse, *Titre du document*, 2005. 40
- [85] S. Sbiai, *Titre de l'ouvrage ou de l'article*, 2011. 41
- [86] APS, *Titre de l'article*, 2023.
- [87] A. Zaid et P.F. de Wet, *Date Palm Cultivation*, FAO Plant Production and Protection Paper 156 Rev.1, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), 2002. 38, 40, 41

- [88] M. Al-Maaded, N. Madi, R. Kahraman, A. Hodzic et N. Ozerkan, *Date palm wood flour as filler in polypropylene composites : Mechanical and thermal properties*, \*Journal of Materials and Environmental Science\*, vol. 3, no. 2, pp. 319–326, 2012. 41
- [89] T. Ashour, H. Wieland, G. Georg, W. Wu et M. Karpenstein-Machan, *The influence of natural reinforcement materials on insulation values of earth plaster for straw bale buildings*, \*Materials Design\*, vol. 32, no. 10, pp. 5117–5126, 2011. 41
- [90] H. El-Mashad et R. Zhang, *Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste*, \*Bioresource Technology\*, vol. 101, no. 11, pp. 4021–4028, 2010. 41
- [91] FAO, *Date Palm Cultivation*, Plant Production and Protection Paper 156 Rev.1, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), 2002. 41
- [92] D. Ballerini and N. Alazard Toux, *Les biocarburants : état des lieux, perspectives et enjeux du développement*, Éditions Technip, 2011. 28
- [93] J. Barrette, E. Thiffault, F. Saint-Pierre, S. Wetzel, I. Duchesne, and S. Krigstin, *Dynamics of dead tree degradation and shelf-life following natural disturbances : can salvaged trees from boreal forests 'fuel' the forestry and bioenergy sectors ?*, *Forestry*, vol. 88, pp. 275–290, 2015. 28
- [94] C. Bouchard, L. Orth, and G. Rousseau, *Guide pour l'acquisition des connaissances de base à l'intention des apprenties et des apprentis*, Comité sectoriel de main-d'œuvre en aménagement forestier, 2010. [En ligne]. Disponible sur : [http://www.csmoaf.com/dynamiques/documents/PDF/guide\\_acquisition/guide\\_recolte.pdf](http://www.csmoaf.com/dynamiques/documents/PDF/guide_acquisition/guide_recolte.pdf), consulté le 13 juin 2025. 29, 30
- [95] S. Krigstin and S. Wetzel, *Forest harvest residues available in Eastern Canada – A critical review of estimations*, *The Forestry Chronicle*, vol. 90, no. 6, 2014. 30
- [96] G. Douville, V. Vallée, A. Proulx, and M. Proulx, *Profil des produits forestiers. Première transformation. Biomasse forestière résiduelle. Inventaire des méthodes et équipements de récupération ainsi que des systèmes de combustion les plus courants*, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Centre de recherche industrielle du Québec, 2006. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/biomasse-forestiere.pdf>, consulté le 13 juin 2025. 30
- [97] C. Dutriez et F. Watterlot, *Comparaison des procédés de production de bioéthanol à base d'amidon. Étude bibliographique*, École des Mines de Douai, 2014, 30 pages. 24
- [98] J. Polleau, *Caractérisation des biogaz*, INERIS, Rapport DRC-02-27158-AIRE-n°316bJPo, 2002, 31 pages. 25
- [99] F. Volle, *Les biocarburants*, support de cours, IUT de Saint-Denis, Université Paris 13, 2017. 24, 25, 26

- [100] H. Lyko, G. Deerberg, and E. Weidener, *Coupled production in biorefineries : Combined use of biomass as a source of energy, fuels and materials*, Journal of Biotechnology, vol. 142, no. 1, pp. 78–86, 2009. 22
- [101] K. Menrad, A. Klein, and S. Kurka, *Interest of industrial actors in biorefinery concepts in Europe*, Biofuels, Bioproducts and Biorefining, vol. 3, no. 3, pp. 384–394, 2009. 22
- [102] A. Akbi, *Le potentiel algérien en bioénergies*, Revue des Energies Renouvelables, n°14, pp. 120–122, 2016. 26
- [103] *Les biocarburants de première génération*, [en ligne], disponible sur : [http://www.biorefinery.ws/fr/bio\\_1eregen.php](http://www.biorefinery.ws/fr/bio_1eregen.php), consulté le 30 mai 2025. 20
- [104] D. Lorne, *Le point sur les biocarburants : progression des marchés nationaux et internationaux*, IFP Energies Nouvelles (IFPEN), 2011. 25
- [105] F. Paillet et G. Taillades, *Les biocarburants, recherche scientifique*, Université Montpellier 2, France, 2013, 18 pages. 25, 26
- [106] A. Bayrakci and G. Kaçar, *Second-generation of bioethanol production from water hyacinth and duckweed in Izmir*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 30, pp. 306–316, 2014. 25
- [107] *Site web Le WPédagogique*, disponible sur : <http://www.lewpedagogique.com>, consulté le 30 mai 2025. 26
- [108] Agence Ecofin, *Titre de l'article*, 2023.
- [109] Bal et al., *Les énergies renouvelables : état de l'art et perspectives de développement à partir de la digestion anaérobie des déchets organiques*, 2001.
- [110] *Méthanisation (production de biogaz et de digestat)*, Énergies Renouvelables, 2011.
- [111] T. Tasneem, *Biogas Energy*, année de publication.
- [112] T. Tasneem, *Biogas Energy*, année de publication.
- [113] K. Gaj, *Titre de l'ouvrage ou de l'article*, 2017.
- [114] J. Romero-Guiza, *Titre de l'ouvrage ou de l'article*, 2015.
- [115] J. Jaafar, *Titre de l'ouvrage ou de l'article*, 2010.
- [116] A. Touzi et Y. Azbbès, *Avant-projet de réalisation d'une unité de production de bioalcool dans les wilayas de Biskra, Adrar et Ghardaïa*, Rapport interne, Laboratoire de Biotechnologie, 1988.
- [117] F. Paillet, *Titre de l'ouvrage ou de l'article*, 2013. 25, 26
- [118] M. Sadi, *Titre de l'ouvrage ou de l'article*, 2012.

- [119] A. Boulal, *Titre de l'ouvrage ou de l'article*, 2010.
- [120] A. Fromentin, F. Biollay, A. Dauriat, H. Lucas-Porta, J.D. Marchand, and D. Sarlos, *Caractérisation de filières de production de bioéthanol dans le contexte helvétique*, Office Fédéral de l'Énergie, Rapport final, Lausanne, Suisse, 120 p., 2000.
- [121] N. Eloutassi, B. Louaste, L. Boudine, and A. Remmal, *Valorisation de la biomasse lignocellulosique pour la production de bioéthanol de deuxième génération*, *Revue des Énergies Renouvelables*, Vol. 17, N°4, pp. 600–609, 2014.
- [122] N. Eloutassi, B. Louaste, L. Boudine, and A. Remmal, *Valorisation de la biomasse lignocellulosique pour la production de bioéthanol de deuxième génération*, *Revue des Énergies Renouvelables*, Vol. 17, N°4, pp. 600–609, 2014.
- [123] M. D. Ould el Hadj, Z. Bitour, and O. Siboukeur, *Étude de la production de levure boulangère (*Saccharomyces cerevisiae*) cultivée sur mout de rebuts de dattes*, *Courrier du Savoir*, Vol. 7, pp. 13–18, 2006.
- [124] A. Boulal, B. Benali, M. Moulai, and A. Touzi, *Transformation des déchets de dattes de la région d'Adrar en bioéthanol*, *Revue des Énergies Renouvelables*, Vol. 13, N°3, pp. 455–463, 2010.
- [125] S. Chniti, H. Djelal, I. Bentahar, M. Hassouna, and A. Amrane, *Optimisation de l'extraction des jus de sous-produits de dattes (*Phoenix dactylifera* L.) et valorisation par production de bioéthanol*, *Revue des Énergies Renouvelables*, Vol. 17, N°4, pp. 529–540, 2014.
- [126] I. Mehani, A. Boulal, and Bouchekima, *BioFuel Production from Waste of Starting Dates in South Algeria*, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 80, pp. 1039–1041, 2013.
- [127] A. Boulal, B. Benali, M. Moulai, and A. Touzi, *Transformation des déchets de dattes de la région d'Adrar en bioéthanol*, *Revue des Énergies Renouvelables*, Vol. 13, N°3, pp. 455–463, 2010.
- [128] M. Yakoubi, A. Boulal, Y. Bakache, H. Gaffour, and B. Benal, *Valorisation énergétique de la betterave sucrière*, *Journal of Bioresources Valorization*, Vol. 1, N°1, pp. 52–55, 2016. <http://www.biolival.com/index.php/revue/archives-jvb>
- [129] Ministère de l'Industrie Pharmaceutique (MIP), *Liste des établissements pharmaceutiques de fabrication agréés*, Février 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.miph.gov.dz/fr/wp-content/uploads/2023/02/etablisements-de-fabrication.pdf> 42
- [130] Y. Bouchema, A. Boudghene Stambouli et M. Belhamel, *Renewable Energy Systems in Algeria*, *Revue des Énergies Renouvelables*, vol. 24, no. 2, pp. 231–244, 2021. 47

- [131] A. A. Rentizelas et I. P. Tatsiopoulou, *Locating a bioenergy facility using a hybrid optimization method*, *International Journal of Production Economics*, vol. 123, no. 1, pp. 196–209, 2010. 48, 57, 62
- [132] C. Tavanandi, S. R. Mohan et N. Gopinath, *Multi-criteria decision-making approach for the selection of bioethanol plant location in India*, *Renewable Energy*, vol. 127, pp. 474–486, 2018; K. K. Castillo-Villar, J. J. Douglas et A. M. Barker, *Optimization of the location of bioethanol production plants considering multiple biomass sources*, *Computers and Chemical Engineering*, vol. 104, pp. 1–16, 2017; W. A. Fuller, *Measurement Error Models*, New York : Wiley, 1985; K. L. Kenney, W. A. Smith, L. J. Gresham et D. J. Westover, *Understanding biomass feedstock variability*, *Biofuels*, vol. 4, no. 1, pp. 111–127, 2013. 48
- [133] A. A. Rentizelas, A. J. Tolis et I. P. Tatsiopoulou, *Logistics issues of biomass : The storage problem and the multi-biomass supply chain*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 4, pp. 887–894, 2009. 48
- [134] B. Sharma, S. Ingalls, C. Jones et A. H. Khanchi, *Biomass supply chain design and analysis : Basis, overview, modeling, challenges, and future*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 608–627, 2013. 56
- [135] M. A. Quddus, M. H. Farid, A. S. M. I. Uddin et M. M. Alam, *Optimization of bioethanol supply chain considering multiple feedstocks using mixed-integer linear programming*, *Energy*, vol. 150, pp. 833–848, 2018. 56
- [136] D. Yue, F. You et S. W. Snyder, *Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization : Overview, key issues and challenges*, *Computers and Chemical Engineering*, vol. 66, pp. 36–56, 2014. 56
- [137] M. Ben Daya et M. Nourelfath, *Design of sustainable supply chains under quality and maintenance considerations*, *International Journal of Production Economics*, vol. 213, pp. 219–232, 2019. 56
- [138] Bouchema, Y., Boudghene Stambouli, A., & Belhamel, M. (2021). *Renewable Energy Systems in Algeria*. *Revue des Énergies Renouvelables*, **24**(2), 231–244. 47
- [139] Kusumastuti, R., Gholami, M. F., & Simatupang, T. M. (2016). *A review of biomass supply chain management : Models and methods*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **70**, 938–954.
- [140] Razm, M. S., Khorshidi, R., & Amidpour, M. (2021). *Optimization of biomass supply chain network design : A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **143**, 110859.
- [141] Bouchema, Y., Boudghene Stambouli, A., & Belhamel, M. (2021). *Renewable Energy Systems in Algeria*. *Revue des Énergies Renouvelables*, **24**(2), 231–244. 47
- [142] Kenney, K. L., Smith, W. A., Gresham, G. L., & Westover, T. L. (2013). *Understanding biomass feedstock variability*. *Biofuels*, **4**(1), 111–127.

- [143] Nur, A. A., Nasution, H. Z., & Harahap, M. B. (2021). *Optimization of biomass supply chain for bioenergy production : A review. IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, **912**(1), 012030.