
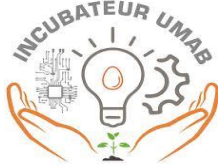
	الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية	
	People's Democratic Republic of Algeria	
	وزارة التعليم العالي والبحث العلمي	
	Ministry of Higher Education and Scientific Research	
	جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم	
	Abdel Hamid Ibn Badis University - Mostaganem	
	كلية العلوم والتكنولوجيا	
	Faculty of Sciences and Technology	
قسم هندسة الطرائق	Department of Process Engineering	



N° d'ordre : M2...../GP/2025



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme Master Startup dans le cadre de l'arrêté ministérielle 1275

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie Chimique

Thème

Optimisation de l'extraction d'huile essentielle à l'aide de méthodologie de plans d'expérience et l'intelligence artificielle

Présenté par :

1-BOA Naira da Rosalina Salvador

2-ATMANI Rahma Kaouter

Soutenu le 13 / 07 / 2025 devant le jury composé de :

Président	GHEZZAR Mouffek Redouane	Professeur	Université de Mostaganem
Examineur	AIT SAADA Djamel	Professeur	Université de Mostaganem
Représentant incubateur	MRAH Moustapha	Professeur	Université de Mostaganem
Rapporteure	BENIDRIS Elbatoul	Maitre de Conférences "B"	Université de Mostaganem
Rapporteure	BENKERDAGH Saliha	Maitre de Conférences "B"	Université de Mostaganem
Rapporteure	ABBASSENE Fatiha	Maitre de Conférences "A"	Université de Mostaganem

Année universitaire :2024/2025

Dédicaces

Je donne l'honneur à Dieu, qui est toujours fidèle et riche en bonté dans ma vie, ce master est une promesse qu'il m'a donnée et il a accompli, même quand ce n'était pas évident.

À mon grand frère Edson Boa, qui m'a pris en charge comme s'il était mon père, merci de croire toujours en moi et d'être mon inspiration.

À ma Mère Rosa Maria, qui a toujours cru dans mes rêves et m'a laissée voler pour les conquérir.

À mes sœurs Nucha e Dheyse, merci d'être toujours là pour me montrer que ce que vous n'avez pas encore atteint, moi je le peux.

À John Nyembe, mon meilleur ami, l'amour de ma jeunesse, pour être un loyal compagnon et toujours me donner le morale.

À mes chers amis, Vianie, Ilda, Gisela, Anita, Nádia, Rahma, ce parcours ne pourrais pas être le même sans votre amitié, loyauté, vous avez été une famille pour moi en Algérie, et je n'imagine pas mon parcours sans vous.

BOA Naira da Rosalina Salvadore

Tout d'abord, je remercie Allah de m'avoir donné la vie, la santé et d'avoir
fait de moi
ce que je suis aujourd'hui. Je dédie ce travail à la lumière de ma vie, la
flamme de mon
chemin, à celle qui m'a encouragée tout au long de mes études, à celle qui
fait de moi une bonne personne dans ce monde, qu'Allah te protégé et te procure
une bonne santé, à ma mère.
Tu es l'homme le plus pur, tu as toujours été pour moi un exemple du
père respectueux,
honnête, grâce à toi j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité.
Merci pour tout
l'amour que tu m'as donné durant mon enfance et que tu continues de
m'apporter chaque jour.
Je suis fier de dire que vous êtes mes frères et que vous êtes du même
sang que celui qui coule dans mes veines. J'espère que votre vie sera des
meilleures et que vous
Puissiez réaliser tous vos rêves, à Abdelkrim et Mohamed Ali.
A celles qui sont comme des sœurs, merci pour chaque minute et
chaque seconde que nous avons partagées ensemble. Merci d'avoir été à
mes côtés dans mes joies et mes peines. J'espère que tous nos rêves se réaliseront
un jour, à Fatiha et Ibtissem
C'est le hasard qui fait les amis et les amis sont une deuxième famille, à
Rachida et à mes chères amis Naira, Houcine, Bahmani, Adim. Je ne peux
trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection, vous êtes
pour moi des sœurs et frères sur qui je peux compter. Je me souviendrai toujours
de tous les moments que nous avons passés ensemble, avec des hauts et des bas.
Merci d'être dans ma vie,
Je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

A. T. M. A. N. O. Rahma Kaouter

Remerciements (1/2)

Après cinq années d'études riches en apprentissages, en découvertes et en expériences marquantes, voici enfin venu le moment de présenter ce mémoire de fin d'études – fruit de plusieurs années de travail, de persévérance et de passion.

Avant tout, nos remerciements s'adressent à Allah, Le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la santé, la force, le courage et la patience nécessaires à l'aboutissement de ce travail. Rien de tout cela n'aurait été possible sans Sa grâce et Sa bénédiction.

Nous remercions vivement Monsieur **AÏT SAADA**, Professeur et Directeur du laboratoire de **Technologie Alimentaire et Nutrition**, pour son accueil au sein de son équipe et pour les excellentes conditions de travail mises à notre disposition durant le stage. Merci aussi d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Nos sincères remerciements vont aussi à Monsieur **BELHAKEM**, Professeur et responsable du laboratoire **Structure, Élaboration et Application des Matériaux Moléculaires**, pour son accueil et son appui matériel, notamment lors des travaux de sonication.

Nous tenons également à remercier Madame **ABDELMALEK Fatiha**, Professeur et Directrice du laboratoire des **Sciences et Techniques de l'Environnement et de la Valorisation**, pour sa collaboration et son appui scientifique.

Nous adressons notre profonde reconnaissance à nos trois encadrantes, Dr. **BENIDRIS Elbatoul**, Dr. **BENKARDEGH Saliha** et Dr **ABBASSENE Fatiha**, pour leur encadrement sérieux et rigoureux, pour la pertinence de leurs conseils, leur bienveillance constante et leur grande disponibilité tout au long de ce projet. Leur accompagnement a été essentiel à la réalisation de ce mémoire.

Remerciements (2/2)

Nos remerciements chaleureux vont également à Monsieur **GHEZZAR Mouffek Redouane**,
Professeur et Doyen de la
Faculté des sciences et de la technologie, pour son soutien constant à la formation des
étudiants et à la valorisation de la recherche scientifique, ainsi que pour ses conseils et ses
orientations avisés depuis le début de ce projet et d'avoir accepté de présider le jury.

Enfin, un remerciement tout particulier à Madame **CHIEKH CHOUYOUKH Khadidja**,
doctorante, pour son aide précieuse, ses explications claires, sa patience et sa générosité tout
au long de notre travail.

Nos vifs remerciements s'adressent aux représentants de l'incubateur ainsi qu'aux partenaires
socio-économiques pour l'intérêt porté à notre travail.

Un remerciement particulier pour la technicienne de **Technologie Alimentaire et Nutrition**,
DAMENE Fatima.

À toutes et à tous, nous adressons nos plus sincères remerciements, empreints de respect et de
gratitude.

Liste des figures

Figure I.1. Cartes des principales espèces forestières en Algérie	- 3 -
Figure I.2.Aspect des feuilles et des inflorescences de l'eucalyptus commun ou Gommier (Eucalyptus globulus).....	- 5 -
Figure I.3.Structures contenant les huiles essentielles	- 6 -
Figure I.4.Exemples de quelques monoterpènes	- 9 -
Figure I.5.Exemples de quelques sesquiterpènes	- 9 -
Figure I.6.Exemples de composés aromatiques	- 10 -
Figure I.7.Principales méthodes d'extraction des huiles essentielles.....	- 15 -
Figure I.8.Dispositif de l'entraînement à la vapeur.....	- 15 -
Figure I.9.Dispositif Clevenger utilisé lors d'étude	- 16 -
Figure I.10.Dispositif d'extraction par micro-onde	- 17 -
Figure I.11.Dispositif de l'extraction CO ₂ supercritique.....	- 19 -
Figure I.12.schéma représentant les trois principales morphologies de microcapsules issues du procédé de coacervation [38]	- 26 -
Figure II.1.Domaine de la variation des facteurs	- 29 -
Figure II.2.le domaine d'étude.....	- 29 -
Figure II.3.Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse	- 30 -
Figure II.4.Processus d'application d'une approche IA.	- 36 -
Figure III.1.Carte représente le site de la récolte d'eucalyptus de la wilaya de Mostaganem.	- 38 -
Figure III.2.Carte représente l'emplacement de la récolte à GHARDAIA	- 39 -

Figure III.3.Appareil de bain ultrasonique	- 40 -
Figure III.4.Étapes de l'extraction par Hydrodistillation conventionnel Clevenger	- 41 -
Figure III.5.Solution des polymères(gomme arabique et gélatine végétale).....	- 42 -
Figure III.6.Mélange de la solution des polymères	- 43 -
Figure III.7.pH-mètre	- 43 -
Figure III.8 . Le refractomètre.....	- 44 -
Figure III.9.Papier pH	- 44 -
Figure III.10 .Principe de fonctionnement des forêts aléatoires	- 48 -
Figure III.11 : Principe de fonctionnement des MLP.....	- 52 -
Figure IV.1 .(a) huile eucalyptus de MOSTAGANEM VS (b) huile eucalyptus de GHARDAIA	- 58 -
Figure IV.2 . (a) tracé des variables prédites VS expérimentale, (b) tracé des quantiles des résidus en distribution normale	- 63 -
Figure IV.3.iso réponse de différentes interactions entre facteurs(a) AB,(b) AC,(d) CE,(c) AD,	- 67 -
Figure IV.4.Importance relative des interactions en Random Forest.....	- 70 -
Figure IV.5 .Rendement Réel vs prédit RF, Dataset 120	- 72 -
La figure IV.5représente la structure de l'arbre généré.Figure IV.6 .Les sous arbres générés par application du Random Forest pour un jeu de données augmentés (120 enregistrements).-	72 -
Figure IV.7. Rendement réel vs prédit RF (Dataset 12000) et distribution des erreurs.....	- 73 -
Figure IV.8 . Importance des variables RF (Dataset 12000).....	- 74 -
Figure IV.9 .Visualisation de l'arbre RF (Profondeur = 3) pour Dataset 12000	- 74 -
Figure IV.10 .Rendement réel vs prédit par l'algorithme de la régression linéaire.....	- 77 -
Figure IV.11. Rendement réel vs prédit MLP Regressor (120 observations)	- 78 -
Figure IV.14 . Les microencapsulassions des huiles.....	- 79 -
Figure IV.15 .Le dispositif hydrodistillation assisté par ultrasons intensifier	- 80 -

Liste des tableaux

Tableau I.1: Méthodes d'extraction avec leurs inconvénients et avantages -----	21 -
Tableau III.1: Niveaux inférieurs $Z_{i,inf}$, de base $Z_{i,0}$, et supérieurs $Z_{i,sup}$ des paramètres -----	45 -
Tableau III.2 : Conditions opératoires des essais programmés par le plan factoriel des expériences ²⁵ et rendements R_{HE} en huile obtenu -----	46 -
Tableau IV.1 .Etude comparative des principaux travaux sur l'HE-----	59 -
Tableau IV.2 .Analyse de la variance-----	65 -
Tableau IV.3. Les meilleures interaction en Random Forest-----	69 -
Tableau IV.4.Top 5 des interactions doubles selon le modèle de régression linéaire -----	75 -

Liste des abréviations

UMAB	Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem
FST	Faculté des Sciences et de la Technologie
HE	Huiles essentiels
pH	Potentiel hydrogène
R (%)	Rendement de l'extraction
%	Pourcentage
<i>E. globulus</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>

Résumé

الطلب على المنتجات الطبيعية والمستدامة يتزايد باستمرار. وفي هذا السياق يقع مشروع بدء التشغيل المقترح، والذي يهدف أولاً إلى تحسين استخلاص الزيوت العطرية من النباتات المحلية والمتوفرة بيولوجياً ضمن هذا الإطار ، تم وضع مشروع بدء التشغيل هذا ، والذي يتمثل هدفه في تصميم طريقة لتحسين وتكثيف استخراج تكنولوجيا المعلومات من النباتات المحلية والمتاحة ، ثم الكبسولات الدقيقة لها من أجل تثبيت المكونات النشطة وحمايتها. لهذا ، اخترنا ولايتين (واحدة تقع في شمال غرب الجزائر والأخرى في وسط الجزء الشمالي من الصحراء الجزائرية) لهذه الدراسة: مستغانم وگرداية. قمنا بتبني معايير الدراسة من أجل مراقبة تأثيرها على محصول استخراج الزيوت الأساسية ، وتطوير نموذج رياضي يضمن تحسين النتائج التجريبية بشكل جيد. وقد تم تنفيذ تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحسين استخراج هو. من خلال الجمع بين الذكاء الاصطناعي ومنهجية التصميم التجريبي، قمنا بتطوير بروتوكول تجريبي يضمن أقصى إنتاجية وجودة عالية ، والتي تبين أنها 1.2٪ لولاية مستغانم في ظل الظروف التالية: حالة النوع: جاف ، وقت الاستخراج: 3 ساعات ، مع التقطير المائي بمساعدة الموجات فوق الصوتية ، مع تقليل البصمة البيئية. يمكن تطبيق هذه العملية المبتكرة في قطاعات مختلفة مثل مستحضرات التجميل والصيدلة والعلاج بالروائح ، وبالتالي الاستجابة للطلب المتزايد على المنتجات الطبيعية والمستدامة.

كلمات مفتاحية:نبته الكلبتوس - الاستخلاص - التقطير المائي التقليدي - التقطير المائي بمساعدة الموجات فوق الصوتية - التحسين - التصاميم التجريبية - الذكاء الاصطناعي - التكثيف

Résumé

Une augmentation continue de la demande pour des produits naturels et durables, tels que les huiles essentielles (HE), est observée dans divers secteurs, y compris l'alimentation, la cosmétique et la santé. C'est dans ce cadre que se positionne ce projet de startup, qui a pour objectif initial de concevoir un moyen d'optimiser et d'intensifier l'extraction des HE à partir de plantes locales et disponibles, puis de les microencapsuler afin de stabiliser et de protéger les principes actifs. Pour cela, nous avons sélectionné deux wilayas (l'une située au nord-ouest de l'Algérie et l'autre au centre de la partie nord du Sahara algérien) pour cette étude : Mostaganem et Ghardaïa. Nous avons varié les paramètres de l'étude afin d'observer leur impact sur le rendement de l'extraction des huiles essentielles, et pour développer un modèle mathématique garantissant une bonne optimisation des résultats expérimentaux. Les techniques d'intelligence

artificielle ont été mises en œuvre pour optimiser l'extraction des HE. En alliant IA et méthodologie de plans d'expérience, nous avons élaboré un protocole expérimental assurant un rendement maximal et une qualité supérieure des HE, qui s'est avéré être de 1,2 % pour la wilaya de Mostaganem dans les conditions suivantes : état de l'espèce : sèche, durée d'extraction : 3 heures, avec une hydrodistillation assistée par ultrasons, tout en minimisant l'empreinte environnementale. Ce procédé innovant peut être appliqué dans divers secteurs tels que la cosmétique, la pharmacie et l'aromathérapie, répondant ainsi à la demande croissante pour des produits à la fois naturels et durables.

Mots-clé : Huiles essentielles, *Eucalyptus globulus*, Hydrodistillation Conventiennelle, Hydrodistillation assistée par ultrasons, Optimisation et intensification de l'extraction, Plans d'expérience, Intelligence Artificielle.

Abstract

A continuous increase in demand for natural and sustainable products, such as essential oils (HE), is observed in various sectors, including food, cosmetics and health. It is in this context that this startup project positions itself, whose initial objective is to design a way to optimize and intensify the extraction of EO from local and available plants, then to microencapsulate them in order to stabilize and protect the active ingredients. For this, we have selected two wilayas (one located in the northwest of Algeria and the other in the center of the northern part of the Algerian Sahara) for this study: MOSTAGANEM and GHARDAÏA. We varied the parameters of the study in order to observe their impact on the extraction yield of essential oils, and to develop a mathematical model ensuring good optimization of experimental results. Artificial intelligence techniques have been implemented to optimize the extraction of HE. By combining AI and experimental design methodology, we developed an experimental protocol ensuring maximum yield and superior quality of the EO, which proved to be 1.2% for the wilaya of MOSTAGANEM under the following conditions: state of the species: dry, extraction time: 3 hours, with ultrasound-assisted hydrodistillation, while minimizing the environmental footprint. This innovative process can be applied in various sectors such as

cosmetics, pharmaceuticals and aromatherapy, thus responding to the growing demand for both natural and sustainable products.

Keywords: Eucalyptus globulus plant-extraction-conventional hydrodistillation-ultrasound-assisted hydrodistillation-optimization-experimental designs-artificial intelligence-intensification.

Table des matières

Dédicaces.....	i
Remerciements (1/2)	iii
Remerciements (2/2)	iv
Liste des figures	v
Liste des tableaux	viii
Liste des abréviations	ix
Résumé	1
Résumé	1
Abstract	2
Introduction	- 1 -
Chapitre I : L'Eucalyptus et les huiles essentielles.....	- 3 -
I.1 Introduction	- 3 -
I.2 Présentation botanique et géographique du genre Eucalyptus	- 4 -
I.2.1 Définition des HE	- 5 -
I.2.2 Localisation des HE dans la plante.....	- 5 -
I.2.3 Utilisation des HE.....	- 6 -
I.3 Fonctions biologiques des HE	- 7 -
I.3.1 Rôle physiologique.....	- 7 -
I.3.2 Rôle thérapeutique :	- 7 -
I.3.3 Les composés terpéniques	- 8 -

I.3.4	Monoterpènes :	- 8 -
I.3.5	Les sesquiterpènes	- 9 -
I.3.6	Les composés aromatiques	- 10 -
I.4	La toxicité des HE	- 10 -
I.5	Méthode d'identification chimique des HE	- 11 -
I.6	Les caractéristiques physico chimiques.....	- 12 -
I.7	Méthodes d'extraction des Huiles essentielles	- 14 -
I.7.1	Entraînement à la vapeur	- 15 -
I.7.2	Hydrodistillation.....	- 16 -
I.7.3	Extraction sans solvant assistée par micro-ondes (ESSAM).....	- 17 -
I.7.4	Extraction au CO ₂ supercritique	- 18 -
I.7.5	Extraction assistée par les ultrasons(sonication) (méthode utilisée dans cette étude) - 20 -	
I.8	Comparaison des Méthodes d'Extraction.....	- 21 -
I.8.1	Méthode Avantages Inconvénients.....	- 21 -
I.9	La microencapsulation.....	- 22 -
I.9.1	Définition de l'encapsulation	- 22 -
 Chapitre II : Méthodes d'optimisation planification <i>VS</i> Intelligence artificielle..-		
27 -		
II.1	Introduction	- 27 -
II.2	Contribution de la Méthodologie de plans d'expérience dans l'optimisation	- 27 -
II.2.1	Définition d'une expérience	- 27 -
II.2.2	L'importance des plans d'expériences	- 27 -

II.2.3	Vocabulaire des plans d'expériences.....	- 28 -
II.2.4	Surface de réponse.....	- 29 -
II.2.5	Types de plans d'expériences couramment utilisés :	- 30 -
II.2.6	Un plan factoriel complet	- 30 -
II.2.7	Travaux antérieurs de l'extraction des huiles essentielles par plans d'expérience :	- 31 -
II.3	Contribution de l'intelligence artificielle à l'optimisation de l'extraction des huiles essentiels	- 31 -
II.3.1	Introduction	- 31 -
II.3.2	Travaux antérieurs et revue bibliographique	- 32 -
II.3.3	Synthèse critique des approches intelligentes appliquées à l'extraction des huiles essentiels	- 34 -
II.3.4	Description du jeu de données.....	- 35 -
II.3.5	Étapes à suivre pour appliquer un algorithme IA.....	- 36 -
Chapitre III : matériel et Méthodes		- 37 -
III.1	Régions de récolte :	- 37 -
III.1.1	Mostaganem	- 37 -
➤	Ghardaïa.....	- 38 -
III.1.2	La méthode d'extraction choisie.....	- 39 -
III.1.3	Prétraitement avec les ultrasons (sonication)	- 39 -
III.2	Le rendement de HE.....	- 41 -
III.2.1	Le protocole de la micro capsulation par coacervation complexe.....	- 41 -
III.3	Les analyses physico-chimiques.....	- 44 -

III.3.1	Indice de réfraction.....	- 44 -
III.3.2	Le pH.....	- 44 -
III.4	Plans d'expérience.....	- 45 -
III.5	Approches intelligentes choisies	- 48 -
III.5.1	Apprentissage automatique.....	- 48 -
III.5.2	Apprentissage profond.....	- 52 -
Chapitre IV : résultats et discussions		- 55 -
IV.1	Discussion des résultats.....	- 55 -
IV.1.1	Effet de la sonication	- 55 -
IV.1.2	Effet de l'état de la matière première	- 56 -
IV.1.3	L'influence de la durée de l'extraction.....	- 56 -
IV.1.4	L'influence de provenance géographique.....	- 57 -
IV.2	Meilleure condition identifiée	- 57 -
IV.3	Les analyses physico-chimiques de HE	- 58 -
IV.4	pH.....	- 58 -
IV.5	Etude comparative sur les rendements de l'extraction	- 59 -
IV.6	Modélisation par la méthodologie de plans d'expérience	- 61 -
IV.7	Validité du modèle mathématique.....	- 63 -
IV.8	Modélisation par IA.....	- 67 -
IV.8.1	Formules d'évaluation des modèles :	- 67 -
IV.8.2	Random Forest.....	- 68 -
IV.8.3	Régression linéaire :	- 75 -
IV.8.4	MLP	- 77 -

IV.9	La Microencapsulation	- 78 -
IV.10	Intensification des procédés.....	- 79 -
	Conclusion.....	- 81 -
	Références Bibliographiques :	- 82 -
	Business Model Canvas	- 87 -

Introduction

La demande mondiale en composés bioactifs naturels, notamment les huiles essentielles (HE) durables et écologiques est de plus en plus grande. Dans le cadre de la chimie des produits naturels, l'optimisation des procédés d'extraction des huiles essentielles représente un enjeu très important, tant pour la préservation des composés bioactifs que pour l'efficacité industrielle. Parmi les plantes riches en HE, citons l'eucalyptus, originaire de l'Australie [1] et qui a été largement introduit dans les pays méditerranéens, notamment en Algérie où il a été planté à partir du XIX^{ème} siècle, pour assécher les zones marécageuses et lutter ainsi contre le paludisme [2].

En Algérie, des espèces telles que *Eucalyptus globulus* et *Eucalyptus camaldulensis* sont très répandues dans le paysage forestier, elles présentent ainsi un fort potentiel de valorisation industrielle, notamment dans la production des huiles essentielles riches en composés bioactifs.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet Strat up de l'Arrêté Ministériel 1275, qui repose sur une démarche de la valorisation des ressources végétales locales à travers l'intégration des savoirs traditionnels en phytothérapie combinés à certains procédés modernes. D'après la recherche bibliographique l'extraction couplée avec les ultrasons, en tant que mode de pré-traitement, n'a été mentionnée dans aucune étude réalisée en Algérie et est peu présente dans les recherches ayant utilisé cette technique dans la littérature scientifique. Ainsi, nous proposons la conception d'un dispositif innovant, qui permette à la fois le prétraitement de la matière végétale par les ultrasons et l'extraction dans un seul système, afin de réduire le temps, les coûts énergétiques, maximiser le rendement et réduire les pertes de rendement, ce qui rend le produit final plus accessible et économique, en particulier pour la population algérienne. Ces méthodes écologiques et innovantes non seulement permettent d'optimiser le rendement et la qualité, mais réduisent également l'impact environnemental du procédé. Des produits tels que l'hydrolat, peut être valorisé dans l'industrie cosmétique pour ses propriétés apaisantes, purifiantes et aromatiques, et les résidus de matières végétales pourraient être valorisés comme fertilisants organiques, contribuant à une agriculture, locale verte et régénérative.

Face aux enjeux environnementaux, économiques et technologiques de l'Algérie, cette startup vise à exploiter le potentiel de la biodiversité locale pour générer un impact socio-économique durable et accélérer le développement technologique national.

Nous avons intégré la méthodologie des plans d'expériences et l'intelligence artificielle (IA) pour une optimisation adéquate hybride, physico-chimique et IA, en plus de l'étude du Business Model Canvas (BMC) et du Business Plan (BP). Ces deux outils sont essentiels pour les startups, même s'ils servent des objectifs différents. Le BMC permet de visualiser et de structurer le modèle économique d'une entreprise, tandis que le BP détaille la stratégie financière et commerciale de manière plus approfondie. Le BMC peut précéder le BP, servant de base à la réflexion stratégique, et tous deux sont importants pour la gestion et la levée des fonds d'une startup.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Une partie bibliographique, avec deux chapitres : le premier est consacré à des données sur l'espèce végétale utilisée pour l'extraction des huiles essentielles, l'eucalyptus (*Eucalyptus globulus*), les différentes méthodes d'extraction des HE, ainsi que les travaux réalisés dans ce sens en Algérie et au niveau mondial. Un deuxième chapitre décrit la méthodologie des plans d'expériences et l'outil IA utilisé dans ce travail.

Le chapitre 3 détaille le matériel utilisé ainsi que toutes les méthodes et procédures expérimentales mises en œuvre.

Dans le chapitre 4, nous exposons les résultats obtenus et les discussions qui en découlent.

Nous terminons le manuscrit par une conclusion et les principales perspectives qui ressortent de ce projet.

Chapitre I :

I'Eucalyptus et les huiles essentielles

I.1 Introduction

Les forêts algériennes sont constituées de peuplements de pins d'Alep, d'eucalyptus, de chênes lièges, de chênes zen, de pins maritimes et de cèdres.-Parmi les feuillus, les eucalyptus et les chênes sont les plus importants. La figure I.1 montre la distribution des principales espèces forestières en Algérie [1]..

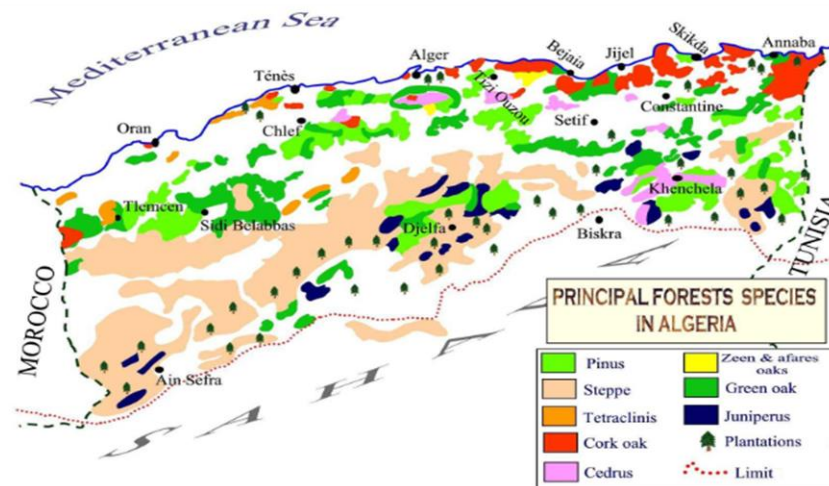


Figure I.1. Cartes des principales espèces forestières en Algérie

En Algérie, les eucalyptus se trouvent principalement dans la partie nord du pays, en particulier dans l'est. Ils couvrent une vaste superficie de forêts artificielles, surtout dans les régions côtières et subhumides. On peut également les retrouver dans le sud du pays.

I.2 Présentation botanique et géographique du genre *Eucalyptus*

Les *Eucalyptus* sont de grands arbres dont certaines espèces peuvent atteindre 100 mètres de hauteur. Ils sont originaires d'Australie, plus précisément de la province de Tasmanie. L'*Eucalyptus* fut introduit et planté dans les régions subtropicales de l'Asie et du bassin méditerranéen. Possédant une exceptionnelle capacité d'absorber l'eau du sol sur lequel il croît, l'*Eucalyptus* assèche rapidement les marais qu'il colonise, éliminant ainsi les milieux de reproduction des insectes qui transmettent la malaria, d'où le nom qu'on lui attribue, « d'arbre à fièvre » (« fever tree »).

La plupart des *Eucalyptus* ont des feuilles persistantes. Comme les autres membres de la famille des *Myrtaceae*, les feuilles d'*Eucalyptus* sont couvertes de glandes à huile.

L'abondante production d'huile est une caractéristique importante de ce genre. Les feuilles, bleutées, ont une curieuse caractéristique : sur les jeunes arbres, elles sont opposées, sessiles, ovales et glauques, et quand l'arbre grandit, elles deviennent alternes, pétiolées, très allongées, parfois un peu courbées comme des lames de faux, et d'un vert luisant.

Les fleurs sont très variées. Elles ont de très nombreuses étamines qui peuvent être de couleur blanche, crème, jaune, rose ou rouge (Figure I.2).

À maturité, les fruits ont la forme d'un cône, sont secs, et de couleur brune. Ils ont également des valves qui se soulèvent pour laisser échapper les graines lors de leur chute sur le sol[21].



Figure I.2. Aspect des feuilles et des inflorescences de l'eucalyptus commun ou Gommier (*Eucalyptus globulus*)

I.2.1 Définition des HE

Les huiles essentielles sont des substances très volatiles extraites des plantes, contenant les composés actifs responsables de leurs propriétés biologiques et aromatiques.

Elles contiennent un mélange complexe de composés bioactifs leur conférant des propriétés antimicrobiennes, anti-inflammatoires et antioxydantes [4]. Les huiles essentielles (HE) suscitent un regain d'intérêt dans plusieurs domaines. En tant que produits naturels, elles possèdent des caractéristiques physico-chimiques intéressantes, avec une forte valeur ajoutée, tout en respectant l'environnement. Les HE présentent également diverses activités biologiques pertinentes. Par exemple, elles sont utilisées dans le domaine médical grâce à leurs activités biocides (bactéricides, virucides et fongicides) ainsi que leurs propriétés médicinales.[2].

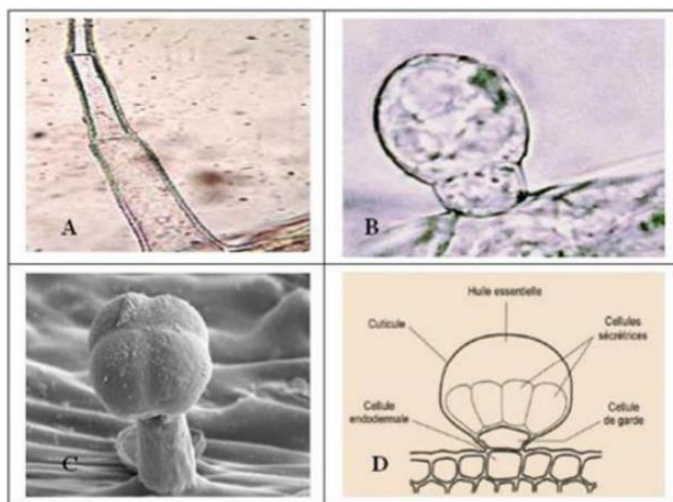
I.2.2 Localisation des HE dans la plante

I.2.2.1 Composition chimique

Les HE sont synthétisés dans le cytoplasme des cellules sécrétrices et ont tendance à s'accumuler dans des cellules glandulaires spécialisées.

Ces dernières peuvent être entreposées dans différents organes : des fleurs, des feuilles, de l'écorce, du bois, des racines, des rhizomes, des fruits ou encore des graines [15].

Selon la voie métabolique utilisée, les huiles essentielles sont principalement composées de deux groupes distincts de composés aromatiques : les terpènes (mono et sesquiterpènes), qui prédominent dans la majorité des essences, ainsi que les composés aromatiques dérivés du phénylpropane [16].



(A) : Poil sécréteur de *Mentha pulegium*,

(B) : Trichome glandulaire de *Mentha pulegium*,

(C) : Trichome glandulaire de *Lippia scaberrima* et

Figure I.3. Structures contenant les huiles essentielles

I.2.3 Utilisation des HE

Les HE suscitent de plus en plus d'intérêt dans divers domaines d'application tels que :

- ✚ **La pharmacie** : Les HE peuvent être utilisés dans l'aromatisation des médicaments destinés à l'administration par voie orale (menthes, verveine, camomille)
- ✚ **La parfumerie et la cosmétologie** De nombreux parfums sont d'origine naturelle et certaines HE constituent des bases de parfums. Exemples : rose, jasmin, vétiver, ylang-ylang, etc.... [10].
- ✚ **Dans l'industrie alimentaire** : Les HE (huile de citron, de menthe, de girofle) sont très utilisés dans l'aromatisation des aliments (jus de fruits, pâtisserie) [11]. Quel que soit le secteur d'activité qui utilise les HE, leur analyse reste une étape importante, voir cruciale. Et malgré les progrès constants réalisés dans les techniques de séparation et d'identification de ces huiles, leur analyse demeure toujours une opération délicate, nécessitant la mise en œuvre simultanée ou successive de diverses techniques [11].

I.3 Fonctions biologiques des HE

I.3.1 Rôle physiologique

Un grand nombre de plantes génèrent des huiles essentielles en tant que métabolites secondaires, cependant, leur fonction précise dans les mécanismes vitaux de la plante reste à déterminer [21].

Il a été décrit sans nul doute plusieurs effets manifestement « bénéfiques » : diminution de la concurrence avec d'autres espèces végétales (allélopathie) par inhibition chimique de la germination des graines, défense contre les agents infectieux microbiens grâce à des capacités fongicides et bactéricides, et protection contre les herbivores due à un goût désagréable et des impacts néfastes sur le système nerveux [22].

Il y a des écrivains qui croient que la plante emploie l'huile pour éloigner ou séduire les insectes, ce qui, dans le second cas, favoriserait la pollinisation. Certains voient l'huile comme une source d'énergie, facilitant diverses réactions chimiques et aidant à conserver l'humidité des végétaux dans les environnements désertiques.

I.3.2 Rôle thérapeutique :

Les huiles essentielles, appréciées pour leurs vertus thérapeutiques, ont une place importante dans notre quotidien, grâce à leurs divers bienfaits thérapeutiques, 24-25.

Elles aident à traiter :

- Les problèmes respiratoires.
- Réduisent la tension nerveuse [26].
- Favorisent la circulation sanguine.
- Aident l'organisme à éliminer les impuretés.
- Apportent un soulagement à la nervosité et aux douleurs rhumatismales.

I.3.3 Les composés terpéniques

Les terpènes représentent un groupe d'hydrocarbures, générés par une multitude de plantes, notamment les conifères. Il s'agit des éléments principaux de la résine et de l'essence de térébenthine dérivée de la résine.

Bien que leur formule de base soit des multiples de l'isoprène C_5H_8 , soit $(C_5H_8)_n$, les terpènes ne sont pas dérivés de cette dernière. Ils sont entraînés sur des Isopentényl pyrophosphate interagissent avec une molécule de départ : Diméthylallyl pyrophosphate (DMAPP), Géranyl pyrophosphate (GPP), Géranylgéranyl pyrophosphui (GGPP), etc. Au contraire, l'isoprène peut être aisément obtenu par la décomposition des terpènes. L'isoprène peut être perçu comme l'un des composants de construction favoris de la nature [17].

I.3.4 Monoterpènes :

Les monoterpènes représentent les éléments les plus simples des terpènes, dont une grande majorité se retrouve dans les huiles essentielles (90%) [18].

Selon le type de couplage « tête-queue », ils contiennent deux unités d'isoprène (C_5H_8). Ils peuvent être de nature acyclique, monocyclique ou bicyclique. Un certain nombre de produits naturels à fonctions chimiques spéciales sont associés à ces terpènes.

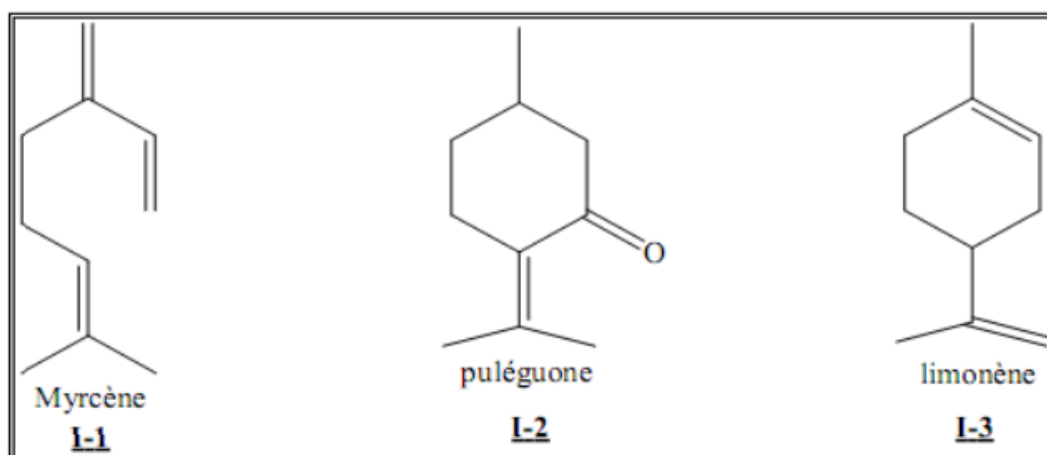


Figure I.4.Exemples de quelques monoterpènes

I.3.5 Les sesquiterpènes

Il s'agit de dérivés d'hydrocarbures ayant pour formule $C_{15}H_{22}$, résultant de l'assemblage de trois unités isoprènes. C'est la catégorie de terpènes la plus variée, se subdivisant en plusieurs catégories de structures : acycliques, monocycliques, bicycliques, tricycliques et polycycliques.

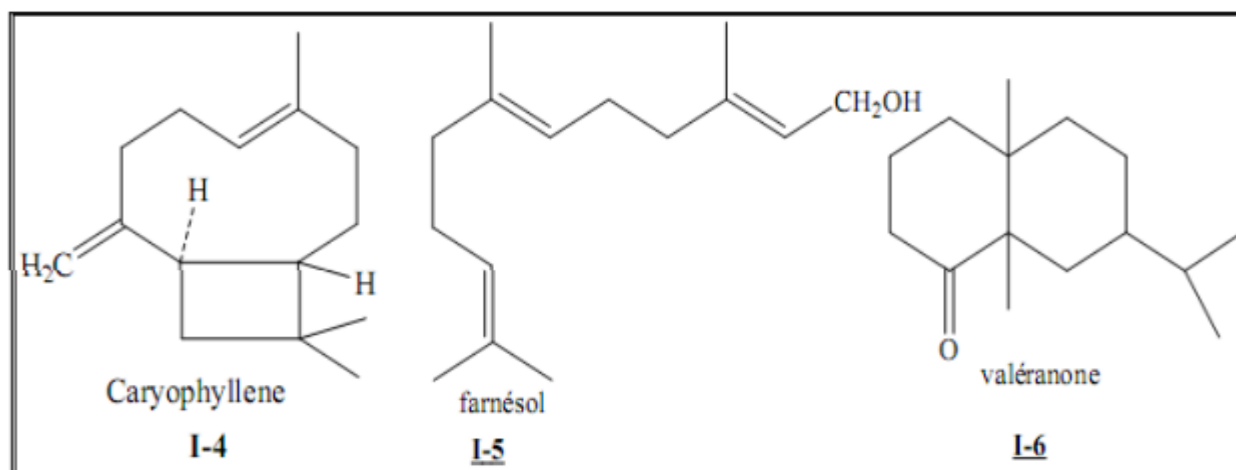


Figure I.5.Exemples de quelques sesquiterpènes

On les trouve dans la nature sous forme d'hydrocarbures ou d'hydrocarbures oxygénés tels que les alcools, les cétones, les aldéhydes, les acides et les lactones.

I.3.6 Les composés aromatiques

Une autre catégorie de composés volatils couramment observés est celle des composés aromatiques dérivés du phénylpropane (Figure I.6) [16].

Cette catégorie comprend des composés aromatiques notables tels que la vanilline, l'eugénole, l'anéthole, l'estragole entre autres. On retrouve une présence importante de ces éléments dans les huiles essentielles de la famille des *Apiaceae* (ou Ombellifères) (comme le persil, la coriandre, l'anis, le fenouil, etc.) et ce sont des traits distinctifs de celles du clou de girofle, de la vanille, de la cannelle, du basilic, de l'estragon et autres [19].

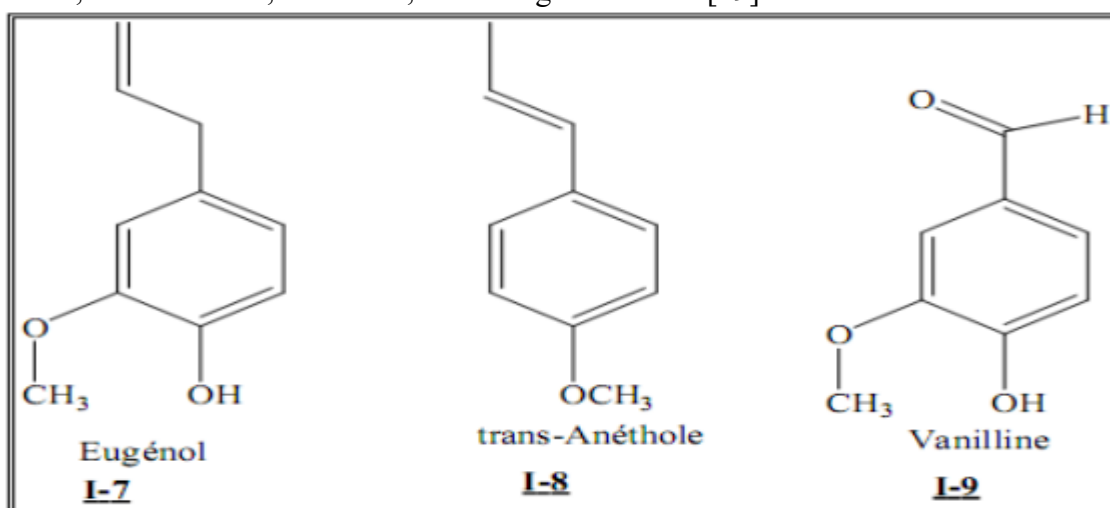


Figure I.6.Exemples de composés aromatiques

I.4 La toxicité des HE

Bien que très bénéfiques pour la santé, les HE ne sont pas sans danger et peuvent présenter une toxicité en cas de mauvaise utilisation. Ainsi, certaines HE peuvent provoquer :

- Une dermocaustique (irritation cutanée par l'HE d'origan, de clou de girofle ou d'écorce de cannelle),
- Une toxicité neurologique avec des convulsions et des vertiges (HE de sauge officinale, romarin à camphre),

- Une toxicité hépatique (foie) par l'HE d'origan, de thym thymol ou cannelle, bergamote).
- Des allergies (dermatites, asthme), Ex. : HE de mélaleuca (arbre à thé ou tea tree), citronnelle.
- Perturbation endocrinienne : Ex. : HE de tea et lavande (effets œstrogéniques discutés).
- Cancérogénicité ou génotoxicité suspectée (à fortes doses) : Ex. : Estragol (basilic exotique, estragon), méthyl eugénol (laurier).

I.5 Méthode d'identification chimique des HE

L'examen chimique des huiles essentielles permet de reconnaître et de mesurer leurs constituants. Les avancées dans les techniques d'analyse permettent de détecter rapidement une vaste gamme de composés. Ainsi, la méthode généralement adoptée pour analyser est la chromatographie en phase gazeuse (CPG). Cette méthode autorise l'examen de mélanges, qui peuvent être extrêmement complexes et présenter une volatilité très variable, notamment en ce qui concerne les huiles essentielles [23].

1. La chromatographie en phase gazeuse (CPG)

La CPG est une méthode d'analyse basée sur la séparation, adaptée aux composés gazeux ou susceptibles d'être transformés en gaz par chauffage sans décomposition. C'est la méthode de séparation la plus couramment employée pour l'analyse chimique des huiles essentielles, car elle permet l'identification des composants à partir d'échantillons allant du millilitre au microlitre.

L'évolution technologique dans les domaines des colonnes capillaires, des phases stationnaires et des détecteurs à ionisation de flamme (FID) a permis de rendre la chromatographie en phase gazeuse indispensable pour l'étude des huiles essentielles [26].

Chaque composant est défini par un indice déterminé à partir d'une série d'alcanes, ou plus rarement de méthylesters linéaires, sous les mêmes conditions d'analyse des échantillons [24], ou par programmation de température (indices de rétention).

Les durées de rétention, même si elles sont propres à un composé, peuvent fluctuer d'une analyse à l'autre, surtout en raison du vieillissement des colonnes [26].

2. Association de la chromatographie en phase gazeuse et de la spectrométrie de masse (CPG/SM)

L'association aisée de ces deux méthodes, les avancées réalisées dans le traitement du signal en temps réel, l'établissement de bases de données de spectre de masse et la CPG.

L'élaboration d'algorithmes permettant de comparer le spectre d'un composé non identifié avec ceux enregistrés dans la base de données est à l'origine de la popularisation de l'utilisation de la CPG/SM dans les laboratoires d'examen des agents aromatisants. La CPG sur colonne capillaire représente une méthode d'injection de l'échantillon dans le spectromètre de masse de grande qualité.

Donc, la colonne capillaire est directement connectée à la source d'ions qui permet l'ionisation dans l'analyse d'impact électronique [23].

I.6 Les caractéristiques physico chimiques

Du point de vue des propriétés physico-chimiques, les huiles essentielles constituent un ensemble très homogène. Voici leurs principales caractéristiques : [20].

- Sont liquides à température ordinaire, elles n'ont pas la texture grasse et lisse des huiles.
- Sont volatiles et rarement colorées.
- Ont une faible densité (riches en monoterpènes).
- Un indice de réfraction qui fluctue principalement en fonction du contenu en monoterpènes et en dérivés oxygénés. Un indice élevé sera donné par une concentration importante en monoterpènes, tandis qu'une présence élevée de dérivés oxygénés aura l'effet opposé.
- Elles sont solvables dans les alcools à forte teneur en alcool et dans la majorité des solvants organiques, mais leur solubilité dans l'eau est faible.
- Possèdent une capacité de rotation, elles sont essentiellement constituées de composés asymétriques.

- Étant très sujets à l'oxydation et facilement polymérisables, il est préférable de les garder loin de la lumière et de l'humidité afin d'éviter production de produits résineux [28]

I.7 Méthodes d'extraction des Huiles essentielles

Les huiles essentielles sont obtenues avec des rendements très faibles (de l'ordre de 1%), ce qui en fait des substances rares et très précieuses. Ainsi les techniques d'extraction des huiles essentielles doivent d'une part, tenir compte de ces caractéristiques et d'autre part, apporter des performances quantitatives satisfaisant une demande toujours plus importante.[5].

Le choix de la méthode d'extraction dépend essentiellement de la matière végétale, de son état et de ses caractéristiques. Cependant, le coût parfois élevé de certaines techniques d'extraction ainsi que les modifications indésirables de la qualité de l'huile essentielle peuvent également influencer le choix de la méthode. Ce choix conditionne un grand nombre de caractéristiques de l'huile essentielle : sa viscosité, sa couleur, sa solubilité, sa volatilité mais aussi son enrichissement ou son appauvrissement en certains constituants. Le producteur d'huile essentielle devra donc choisir une méthode offrant à la fois une grande qualité d'huile essentielle et un coût de production raisonnable [32].[2].

Plusieurs techniques d'extraction des huiles essentielles et des principes aromatiques végétaux sont à ce jour connues. Toutefois les normes liées à l'utilisation de ces essences limitent en général le choix de la méthode d'extraction. En effet, la localisation histologique des composés aromatiques dans le végétal ainsi que la destination finale du produit extrait peuvent orienter le choix technologique à utiliser : Les méthodes d'extraction sont adaptées aux propriétés les plus importantes des huiles essentielles notamment leur volatilité dans l'air et dans la vapeur d'eau et leur solubilité dans les solvants organiques.[3] Figures I.6 présente les principales techniques d'extraction des huiles essentielles.

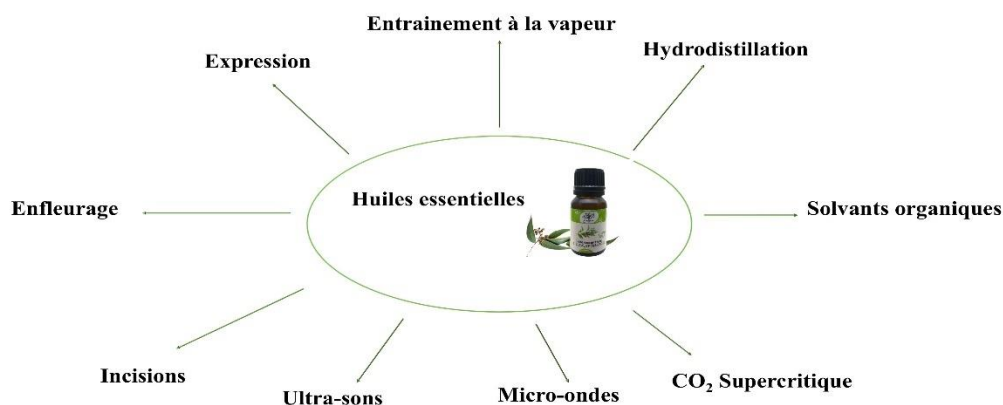


Figure I.7.Principales méthodes d'extraction des huiles essentielles

I.7.1 Entraînement à la vapeur

L'entraînement à la vapeur est une technique traditionnelle qui consiste à injecter de la vapeur d'eau dans un alambic contenant la matière végétale. La chaleur libère les huiles essentielles qui s'évaporent et sont entraînées avec la vapeur, puis sont condensées et séparées dans un essencier .[4]

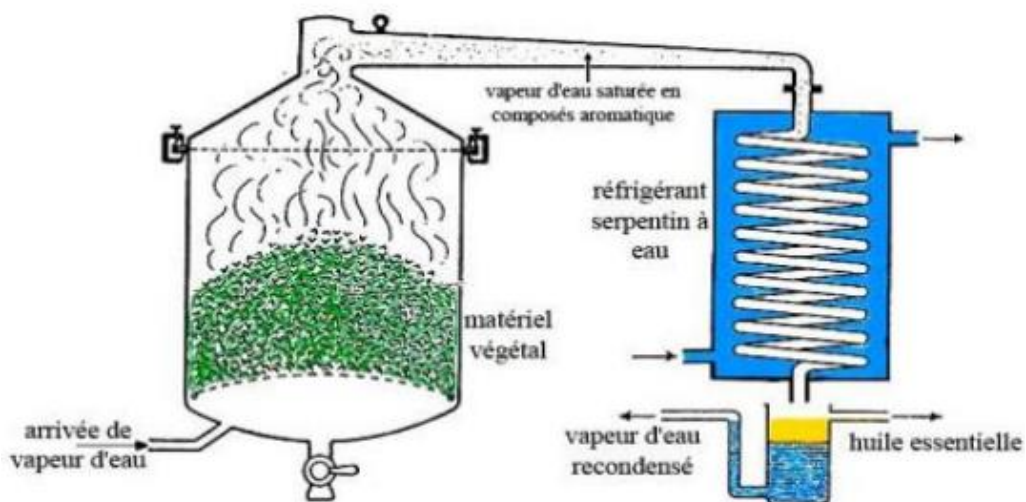


Figure I.8.Dispositif de l'entraînement à la vapeur

➤ **Avantages :**

- Méthode simple et efficace.
- Convient à de nombreuses plantes.
- Qualité de l'huile relativement stable.

➤ **Inconvénients :**

- Temps d'extraction long.
- Risque de dégradation thermique des composés fragiles.

I.7.2 Hydrodistillation

L'hydrodistillation est une variante où la plante est immergée directement dans l'eau chauffée à ébullition [4]. La vapeur entraîne les huiles essentielles qui sont ensuite récupérées après condensation. En laboratoire, le système généralement utilisé pour cette extraction est le **dispositif de Clevenger** (figure I.9).

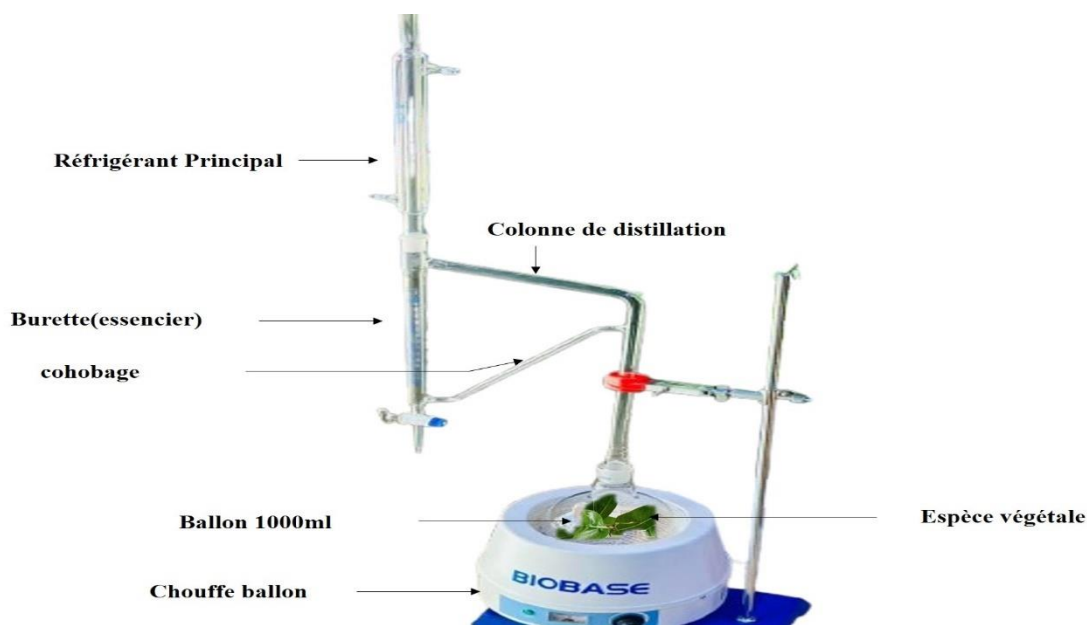


Figure I.9. Dispositif Clevenger utilisé lors d'étude

➤ **Avantages :**

- Convient aux plantes sensibles à la chaleur
- Peut être utilisée pour des petites quantités de matière première

➤ **Inconvénients :**

- Contact prolongé avec l'eau, pouvant entraîner une hydrolyse des composés
- Temps de traitement long

I.7.3 Extraction sans solvant assistée par micro-ondes (ESSAM)

Cette méthode moderne combine l'effet thermique des micro-ondes avec un système de refroidissement rapide pour extraire les huiles essentielles [29] . Elle ne nécessite ni solvant ni eau, ce qui réduit l'impact environnemental.

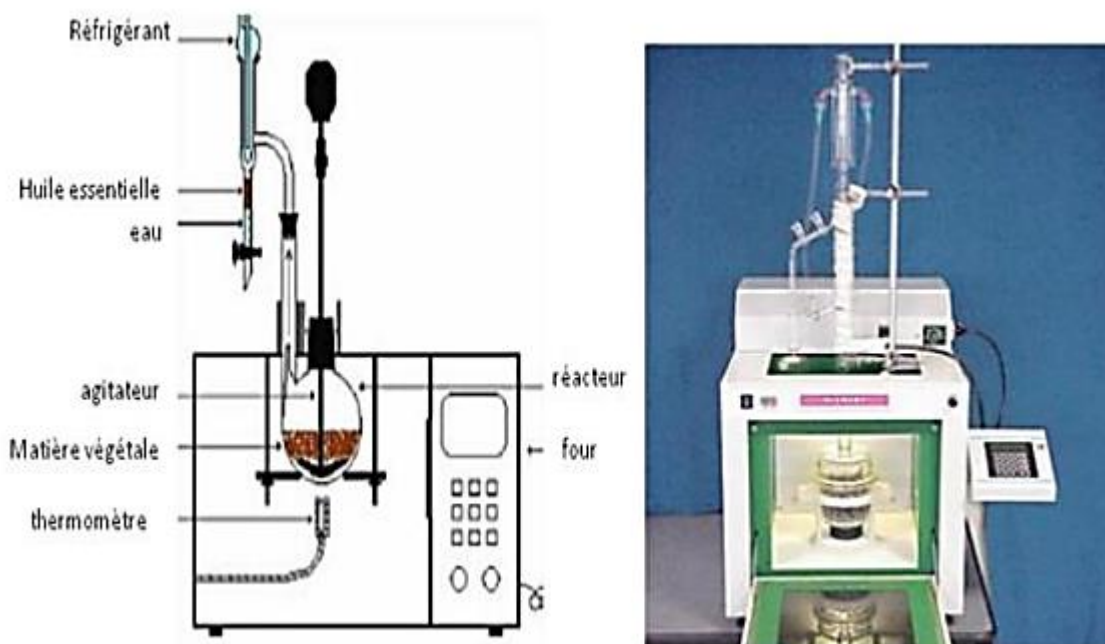


Figure I.10. Dispositif d'extraction par micro-onde

➤ **Mécanisme d'action :**

- Les micro-ondes chauffent rapidement la matière végétale, provoquant une libération rapide des composés volatils.

- L'huile essentielle est condensée immédiatement, minimisant la dégradation thermique.

➤ **Avantages :**

- Extraction rapide (quelques minutes au lieu de plusieurs heures).
- Meilleure préservation des composés thermosensibles.
- Faible consommation d'énergie et absence de solvants.

➤ **Inconvénients :**

- Nécessite un équipement spécifique et coûteux.
- Peut ne pas convenir à toutes les plantes.

I.7.4 Extraction au CO₂ supercritique

Cette technique utilise du dioxyde de carbone à haute pression et température contrôlée pour extraire les huiles essentielles.[28]

➤ **Mécanisme d'action :**

- Le CO₂ supercritique agit comme un solvant permettant d'extraire sélectivement les composés volatils.
- Après extraction, le CO₂ est relâché en réduisant la pression, laissant l'huile essentielle pure sans résidus.

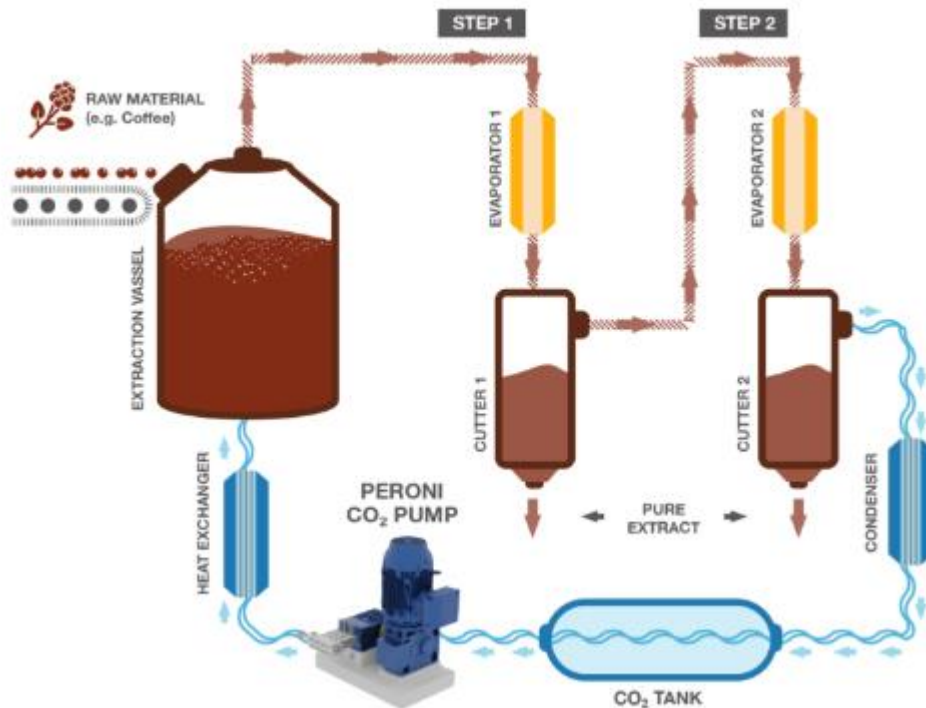


Figure I.11. Dispositif de l'extraction CO₂ supercritique

➤ **Avantages :**

- Haute pureté des huiles essentielles obtenues.
- Absence de solvants toxiques.
- Extraction à basse température, évitant la dégradation thermique.

➤ **Inconvénients :**

- Technologie coûteuse.
- Nécessite des compétences techniques avancées.

I.7.1. Extraction par solvants organiques

L'extraction par solvants utilise des substances comme l'hexane ou l'éthanol pour dissoudre les composés volatils[30]. Après évaporation du solvant, il reste une essence concentrée.

➤ **Avantages :**

- Permet d'extraire des composés non volatils intéressants
- Bon rendement d'extraction

➤ **Inconvénients :**

- Présence possible de traces de solvants résiduels
- Nécessite un procédé de purification supplémentaire

I.7.5 Extraction assistée par les ultrasons(sonication) (méthode utilisée dans cette étude)

Les ultrasons génèrent des vibrations mécaniques dans un solide, un liquide ou un gaz. À la différence des ondes électromagnétiques, les ondes sonores peuvent se propager dans une matière et elles impliquent des cycles d'expansion et de compression lors de la propagation dans le milieu[6]. L'expansion peut créer des bulles qui se forment, se développent et s'effondrent dans un liquide. Près d'une surface solide, l'effondrement de cavité est asymétrique et produit un jet de liquide à grande vitesse [7].

➤ **Facteurs influençant l'extraction**

- Une température trop élevée peut dégrader certains composés bioactifs .[4]
- Une pression adaptée améliore l'efficacité du procédé, notamment dans l'extraction au CO₂ supercritique.

1. Temps d'Extraction

Le temps de l'extraction dépend de la méthode utilisée ainsi que de la nature de la matière végétale -Il a été remarqué lors de [7] l'extraction de l'huile essentielle de romarin, en utilisant la hydrodistillation, que plus le temps était prolongé, plus le rendement augmentait.

Théoriquement, le temps d'extraction est la durée nécessaire pour collecter l'HE totale que l'on trouve dans la matière végétale [7], mais pratiquement, il est difficile de récupérer toute la quantité d'HE contenue dans le tissu végétal.

- Un temps trop court peut limiter le rendement.
- Un temps trop long peut entraîner l'oxydation de certains composants.[2] .

3. Nature de la Plante et Teneur en Huile

• Certaines plantes, comme *Lavandula stoechas* (lavande papillon ou lavande française), ont des teneurs en huile très variables en fonction des conditions climatiques et du stade de croissance.[2]

I.8 Comparaison des Méthodes d'Extraction

I.8.1 Méthode Avantages Inconvénients

Tableau I.1: Méthodes d'extraction avec leurs inconvénients et avantages

Méthode	Avantages	Inconvénients
Entraînement à la vapeur	Méthode éprouvée, peu coûteuse	Temps d'extraction long, dégradation thermique
Hydro distillation	Convient aux plantes sensibles	Risque d'hydrolyse des composés
ESSAM	Extraction rapide, préserve les composés	Coût élevé, équipement spécifique
CO ₂ supercritique	Qualité élevée, pas de solvants	Technologie coûteuse
Solvants organiques	Bon rendement	Risque de contamination par les solvants (résidus)

I.9 La microencapsulation

La microencapsulation permet, en fonction des domaines d'application, de protéger, stabiliser et rendre compatible une substance active avec son environnement de formulation. Elle contribue à l'amélioration de la présentation du produit et permet de masquer d'éventuelles caractéristiques organoleptique indésirables, telles qu'une odeur ou un goût marqué. [32]

Enfin, l'encapsulation peut modifier et contrôler le profil de libération d'une substance active pour obtenir, par exemple, un effet prolongé ou déclenché [32]. L'encapsulation a un bénéfice pour la modification des caractéristiques physiques du produit original afin de [33] :

- Faciliter la manipulation
- Aider à séparer les composants du mélange qui réagirait autrement entre eux.
- Fournir une concentration adéquate et une dispersion uniforme d'un agent actif.

D'une manière générale, l'encapsulation peut être considéré comme un moyen qui permet le piégeage d'un ou plusieurs objets au sein d'un matériau en vue de [33] :

- Son immobilisation
- Sa protection
- Le contrôle de sa libération
- Sa structuration et Sa fonctionnalisation

I.9.1 Définition de l'encapsulation

L'encapsulation est un procédé technologique visant à enfermer une substance ou un mélange de substance actives à l'intérieur d'un matériau spécifique, afin d'en assurer la protection, la stabilité ou le relargage ciblé dans une application donnée. Les substances à encapsuler peuvent être liquides, solides ou gazeuses. Ce sont souvent des principes actifs sensibles ou instables à certains facteurs environnementaux ayant une action ciblée (vectorisation), ou bien des substances dont on souhaite modifier l'état (transformation d'un liquide en solide par exemple) [34].

Dans le domaine d'encapsulation 2 types de particules peuvent être obtenues selon leurs tailles :

✓ Microparticules

✓ Nanoparticules

D'après Benoit et al., (2013) ; la taille des microparticules est comprise entre $1\mu\text{m}$ et $1000\mu\text{m}$, Thies, (1987) a réduit l'intervalle de définition des microparticules de $1\mu\text{m}$ à $500\mu\text{m}$. D'après ces intervalles, toutes les particules qui représente un diamètre inférieur à $1\mu\text{m}$ sont considérées comme des nanoparticules.[33]

I.9.1.1 Procédés d'encapsulation

Différentes méthodes peuvent être mises en œuvre pour optimiser l'encapsulation des composés bioactifs. la sélection de la technique d'encapsulation la mieux adaptée repose essentiellement sur les propriétés des matériaux constitutifs et sur les exigences spécifiques du produit cible. De plus le choix de matériau de la paroi de la capsule a une grande influence sur les propriétés de la substance encapsulée, particulièrement sur l'efficacité d'encapsulation, et devrait être considéré soigneusement [32].

Il existe plusieurs manières de classer les procédés industriels d'encapsulation suivant différents critères [34] :

✓ L'utilisation ou non de solvant organique

✓ La nature du milieu dispersant : liquide, gazeux ou à l'état supercritique

✓ L'utilisation de polymères préformés, de lipides ou de monomères

✓ Le procédé utilisé pour réaliser la micro encapsulation.

Cette dernière manière de classer les procédés industriels est la plus couramment utilisée, donc on distingue 3 groupes de procédés [33] :

- Les procédés mécaniques :

Sont basés sur le séchage ou la solidification de gouttelettes contenant tous les constituants de la future particule.

- Les procédés chimiques :

Sont caractérisés par un déclenchement simultané de la synthèse de la membrane (ou de la matrice) et de l'encapsulation du principe actif. Les procédés chimiques n'utilisent donc pas de matrices enrobâtes préformées.

- Les procédés physico-chimiques :

Sont dépendants : -1- de la solubilité des agents enrobant sous l'effet de variations des conditions physiques (température, pH, ajout d'un non solvant ou d'un polymère incompatible...), -2- de changements d'état (fusion et solidification) des agents enrobant [35].

Les procédés de la micro encapsulation	Les technique	Gamme de tailles de microparticules obtenues	Références
Procédés physicochimiques	Coacervation (simple ou complexe)	2-1200 μm	[32][36]
	Evaporation /extraction de solvant	0.5-200 μm	[33][35]
	Gélification thermique		[35]
Procédés chimique	Polymérisation en milieu	2- 2000 μm	[36]
	Polymérisation radicalaire ou anionique		[33]

Procédés mécaniques	Procédé basé sur la technologie Fluide supercritique	1-200 μm	[36]
	Spray drying	200-800 μm	[35], [36]
	Gélification ou congélation de gouttes	35-5000 μm	[37]
	Enrobage en lit fluidisé		[36]
	Extrusion	$\geq 200 \mu\text{m}$	[35]

I.9.1.2 Micro encapsulation par coacervation complexe

La coacervation complexe correspond à la désolvation simultanée de deux polyélectrolytes hydrosolubles, induite par une modification du pH du milieu aqueux. Ce phénomène conduit à l'association de ces polymères opposés, formant une structure coacervée dont la complexité réside dans la présence de deux macromolécules interagissant par des forces électrostatiques.

Le procédé de micro encapsulation par coacervation complexe se déroule de la façon suivante (figure I-12) :

- Dans un premier temps, le produit à encapsuler (sous forme liquide ou solide) est dispersé dans une solution aqueuse contenant les deux polymères (phase a).

- Dans un deuxième temps, la coacervation est induite par un ajustement du pH de la solution, de façon que les charges positives du premier polymère équilibrent les charges négatives du second (phase b). L'attraction électrostatique des deux polyélectrolytes provoque l'apparition d'un coacervat mixte.

- Dans un troisième temps, les gouttelettes de coacervat formé viennent s'adsorber (phase c) à la surface de la matière active à encapsuler et former un enrobage continu (phase d). Finalement, cet enrobage est consolidé par réticulation (phase e) des macromolécules constitutives du coacervat [37].

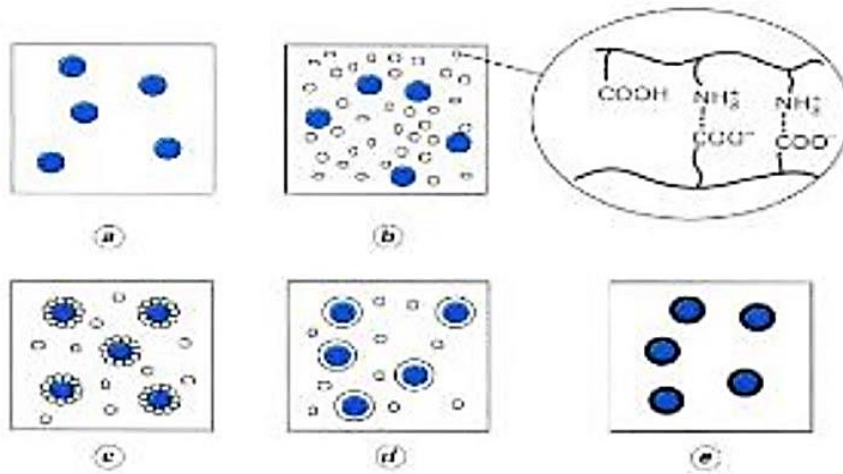


Figure I.12. schéma représentant les trois principales morphologies de microcapsules issues du procédé de coacervation [38]

La micro encapsulation par coacervation complexe trouve de nombreuses applications dans divers secteurs industriels. En milieu pharmaceutique, elle est notamment utilisée pour encapsuler des substances telles que la paraffine liquide et les huiles essentielles destinées à l'aromathérapie. [38]

Chapitre II : Méthodes d'optimisation planification VS Intelligence artificielle

II.1 Introduction

L'optimisation des procédés peut être abordée par des méthodes classiques de planification (comme les plans d'expériences ou la méthode de surface de réponse) ou par des approches issues de l'intelligence artificielle, telles que les réseaux de neurones ou les algorithmes bio-inspirés. Si les premières reposent sur des modèles statistiques structurés, les secondes offrent une plus grande flexibilité face à la complexité croissante des systèmes. Ce chapitre détaille ces deux approches, en mettant en évidence leurs principes, avantages et domaines d'application.

II.2 Contribution de la Méthodologie de plans d'expérience dans l'optimisation

II.2.1 Définition d'une expérience

Épreuves, essais effectués pour étudier un phénomène

- Dans le langage scientifique, fait provoquer ou attendu pour vérifier une hypothèse, une loi, et arriver ainsi à une connaissance théorique de la façon dont se passent les choses

D'autre part le plan d'expérience est une suite d'essais organisés à l'avance, de manière à déterminer, au moyen d'un nombre réduit d'essais et avec un maximum de précision, l'influence de multiples paramètres (facteurs) sur une (ou plusieurs) propriété (s) étudiée(s) (réponses) [39]

.

II.2.2 L'importance des plans d'expériences

La planification expérimentale joue un rôle très important dans la recherche scientifique et l'industrie en permettant une approche systématique pour étudier les relations entre les variables et obtenir des informations précieuses. Un plan d'expérience bien conçu permet de maximiser l'efficacité des études, de réduire les coûts et d'obtenir des résultats fiables et significatifs.

L'importance de la planification expérimentale réside dans les avantages qu'elle offre :

- Efficacité des études
- Informations précises
- Détection des interactions
- Optimisation des réglages
- Analyse statistique rigoureuse

II.2.3 Vocabulaire des plans d'expériences

Il est important de définir le vocabulaire et la terminologie associés aux plans d'expériences :
La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions :

- Espace expérimental ;
- Modélisation mathématique.
- Réponse.

On qualifie de réponse la grandeur qui est observée pour chaque expérience réalisée. En d'autres termes, c'est le résultat mesuré d'une étude. Sachant qu'à chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. L'ensemble de ces dernières, forme la surface de réponse. La valeur d'une réponse ne peut être modifiée que de manière indirecte en faisant varier les facteurs [39].

- **Facteur**

Un facteur peut être toute variable obligatoirement contrôlable, pouvant influencer sur la réponse observée. La différence fondamentale entre la notion de variable et celle de facteur tient donc dans le fait que tout facteur doit pouvoir être modifié sans difficulté. La valeur donnée à un facteur pour réaliser une expérience est appelée niveau [39].

Les facteurs peuvent être : Quantitatifs, Qualitatifs, Contrôlables, Incontrôlables, Continus et discontinus.

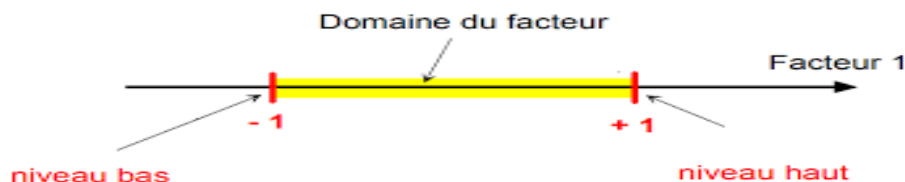


Figure II.1. Domaine de la variation des facteurs

- **Domaine d'étude**

-Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux.

-Regroupement des domaines des facteurs définis « le domaine d'étude ».

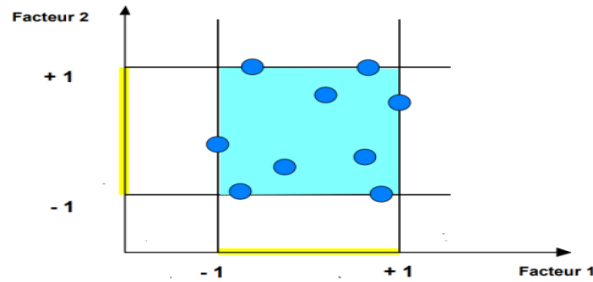


Figure II.2. le domaine d'étude

II.2.4 Surface de réponse

En l'absence de toute information sur la fonction qui lie la réponse aux facteurs, on se donne une loi d'évolution, c'est le modèle mathématique à priori ou le modèle postulé. A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui définissent une surface appelée la surface de réponse.

Les niveaux x_i représentent les coordonnées d'un point expérimental et y_i est la valeur de la réponse en ce point. Pour un plan à deux facteurs, on obtient :

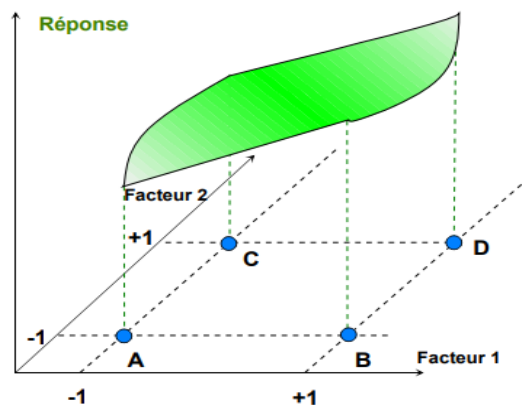


Figure II.3. Les réponses associées aux points du domaine d'étude forment la surface de réponse

II.2.5 Types de plans d'expériences couramment utilisés :

- **Plans factoriels complets ou fractionnaires** : Pour identifier les facteurs significatifs et leurs interactions.
- **Plans de criblage (Screening designs)** : Quand un grand nombre de facteurs potentiels sont à l'étude (par ex., Plans de Plackett-Burman).
- **Plans de surface de réponse (Response Surface Methodology - RSM)** : Pour modéliser la relation entre les facteurs et les réponses, et déterminer les conditions optimales (par ex., Plan Composite Centré - PCC, Plan de Box-Behnken).
 - **Méthode de Taguchi** : Pour l'optimisation des processus robustes

Le plan utilisé pour notre étude est le plan linéaire nommé le factoriel complet

II.2.6 Un plan factoriel complet

Une méthode d'expérimentation puissante utilisée pour étudier l'effet de plusieurs facteurs (variables d'entrée) sur une ou plusieurs réponses (variables de sortie). L'objectif est de comprendre non seulement comment chaque facteur individuellement affecte la réponse, mais aussi comment ils interagissent entre eux.

- Dans un plan factoriel complet, **toutes les combinaisons possibles des niveaux de chaque facteur sont testées**. Par exemple, si vous avez 2 facteurs, chacun à 2 niveaux (par exemple, haut/bas, ou présence/absence), vous aurez $2 \times 2 = 4$ combinaisons expérimentales à réaliser. Si vous avez k facteurs, chacun à 2 niveaux, vous aurez 2^k essais. Si les facteurs ont plus de 2 niveaux, le nombre d'essais augmente encore plus rapidement.

II.2.7 Travaux antérieurs de l'extraction des huiles essentielles par plans d'expérience :

De nombreuses études emploient des plans d'expériences pour améliorer l'extraction des huiles essentielles de différentes plantes. Voici quelques travaux qui portent sur l'utilisation de techniques méthodologiques de plans d'expérience.

- **SAHRAOUI et al. [40]** ont réalisé une étude sur l'optimisation du rendement et de la composition de l'huile essentielle de *Thymus pallescens* par hydrodistillation, en appliquant un plan composite centré. Cette étude a impliqué la variation de la masse de la matière végétale, du temps d'extraction et du débit de vapeur d'eau. Il convient également de mentionner qu'une autre recherche a utilisé des techniques de plans d'expériences.
- **OULD Ali et al.**, ont fait une étude de la composition chimique, l'activité antibactérienne, antifongique et antioxydante d'une plante aromatique et médicinale ; *Laurus nobilis* L. L'extraction de l'huile essentielle a été effectuée par hydrodistillation. Les conditions ont été optimisées selon un plan d'expériences en de surface de réponse de type Box-Benhken *Laurus nobilis* L. (Tigarsalt) [41]
- **BEN NAILI et al.**, porte sur l'optimisation de l'extraction assistée par micro-ondes de composés actifs de l'ail, en utilisant la méthode des plans d'expériences [42].

D'autres études ont porté sur la modélisation de la cinétique de l'extraction, réalisées par :

- **HADJ AMMAR et al [43]**. qui ont modélisé la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de feuilles de myrte par hydrodistillation, en utilisant la loi de Fick, et ont optimisé les paramètres opératoires (temps d'extraction, rapport eau/matière végétale) à l'aide d'un plan composite central.

II.3 Contribution de l'intelligence artificielle à l'optimisation de l'extraction des huiles essentielles

II.3.1 Introduction

L'extraction des huiles essentielles est une étape cruciale dans la valorisation des plantes aromatiques et médicinales. Elle consiste à isoler les composés volatils d'intérêt à l'aide de procédés tels que l'hydrodistillation, la distillation à la vapeur ou encore l'extraction par solvants. Cependant, ces techniques présentent plusieurs limites : variabilité du rendement,

durée d'extraction parfois longue, influence non maîtrisée de facteurs environnementaux ou techniques, etc. Dès lors, l'optimisation des conditions opératoires devient une nécessité pour garantir une production efficace, rentable et de qualité constante.

Traditionnellement, cette optimisation repose sur des approches empiriques, des essais expérimentaux multiples, ou des méthodes statistiques classiques comme la méthode des plans d'expériences. Bien que robustes, ces méthodes sont souvent coûteuses en temps, en ressources, et parfois limitées dans leur capacité à modéliser des phénomènes complexes et non linéaires.

Dans ce contexte, l'intelligence artificielle (IA) s'impose comme une alternative puissante. Grâce à sa capacité à apprendre à partir de données, à détecter des corrélations cachées et à prédire des résultats avec une grande précision, l'IA permet de modéliser le processus d'extraction et d'en déduire des conditions optimales sans recourir à des expérimentations systématiques. Elle peut notamment être utilisée pour prédire le rendement en fonction de plusieurs variables (état de la plante, période de récolte, masse utilisée, durée, type de dispositif...), ou encore pour identifier les facteurs les plus influents sur la qualité des huiles extraites.

La partie suivante est consacrée à l'application de l'intelligence artificielle dans l'optimisation de l'extraction des huiles essentielles. Elle commence par une revue des travaux antérieurs sur l'usage de l'IA dans ce domaine, avant de présenter l'ensemble des approches intelligentes utilisées. L'objectif est de démontrer que même avec un ensemble de données limité, des techniques d'IA bien sélectionnées peuvent fournir des résultats exploitables pour orienter les décisions dans un contexte réel de production.

II.3.2 Travaux antérieurs et revue bibliographique

II.3.2.1 L'IA dans l'agroalimentaire et les procédés biochimiques

Au cours des deux dernières décennies, l'intelligence artificielle (IA) a progressivement trouvé sa place dans le secteur agroalimentaire et dans les procédés biochimiques, en raison de sa capacité à traiter des systèmes complexes, non linéaires et multivariés. Contrairement aux approches traditionnelles, qui exigent souvent un grand nombre d'essais expérimentaux, les

modèles d'IA permettent de prédire les comportements de systèmes à partir de données expérimentales existantes, tout en réduisant les coûts et les délais de développement [44].

II.3.2.2 Applications en extraction végétale, fermentation et distillation

Dans le domaine de l'extraction végétale, plusieurs études ont utilisé des algorithmes d'IA pour optimiser les paramètres opératoires (température, durée, taux d'humidité, granulométrie, pression, etc.) afin de maximiser le rendement ou la qualité des extraits. Les réseaux de neurones artificiels (ANN), les machines à vecteurs de support (SVM) et les forêts aléatoires (Random Forest) sont parmi les techniques les plus utilisées dans ce contexte [45].

Par exemple, des travaux sur l'extraction de composés phénoliques à partir de plantes médicinales ont utilisé des modèles ANN pour estimer le rendement en fonction de paramètres d'extraction comme la température et le type de solvant [46.]. Dans d'autres cas, la modélisation par réseaux de neurones a permis d'identifier les conditions optimales de distillation pour obtenir une concentration maximale de composés volatils dans les huiles essentielles [47.].

Dans le domaine de la fermentation, des modèles basés sur l'IA ont été utilisés pour prédire la croissance microbienne et la production de métabolites en fonction des conditions du milieu (pH, température, concentration en substrat). Ces modèles permettent de simuler des scénarios complexes, de réduire les essais en laboratoire, et d'améliorer le contrôle en temps réel des bioréacteurs [48].

De même, les procédés de distillation, très utilisés dans la production de parfums, d'arômes ou de solvants naturels ont bénéficié de l'intelligence artificielle pour le contrôle des colonnes de distillation, l'optimisation de la consommation énergétique, et la prévision des concentrations de produits à différents niveaux de la colonne [49].

II.3.3 Synthèse critique des approches intelligentes appliquées à l'extraction des huiles essentielles

II.3.3.1 Forces des approches existantes

Les travaux récents démontrent clairement que l'intelligence artificielle (IA), en particulier les réseaux de neurones artificiels (ANN), les modèles hybrides, ainsi que les techniques d'apprentissage profond (Deep Learning), offrent des performances remarquables en matière de prédiction du rendement d'extraction et d'optimisation des conditions opératoires. Leur principal avantage réside dans leur capacité à modéliser des systèmes non linéaires complexes, à partir de données expérimentales limitées. Ils surpassent souvent les méthodes statistiques classiques telles que la régression linéaire ou la méthodologie de surface de réponse (RSM) en termes de précision ($R^2 > 0,95$ dans la plupart des cas) et de robustesse. L'utilisation d'algorithmes d'optimisation (comme PSO ou NSGA-II) combinée à des modèles IA permet par ailleurs de résoudre des problèmes à objectifs multiples, intégrant à la fois rendement, qualité des extraits et propriétés biologiques.

II.3.3.2 Faiblesses et limites identifiées

Malgré leurs performances, ces approches présentent plusieurs limites. Tout d'abord, de nombreux modèles sont entraînés sur des jeux de données réduits (parfois moins de 30 observations), ce qui limite la généralisation à grande échelle. De plus, ces modèles sont souvent développés de façon isolée, sans validation croisée externe ou confrontation à des conditions réelles de production. Le manque d'intégration de données capteurs en temps réel ou de paramètres dynamiques (pH en continu, température instantanée, évolution du taux d'humidité) limite également la portée des modèles IA dans un cadre industriel. Par ailleurs, peu d'études combinent les approches IA avec des systèmes de contrôle automatique ou d'optimisation multi-niveaux, ce qui freine leur intégration dans les chaînes d'extraction automatisées.

II.3.4 Description du jeu de données

II.3.4.1 Présentation des variables

Le jeu de données est composé de **30 enregistrements** (ou runs), chacun représentant une expérience d'extraction d'huile essentielle réalisée sous des conditions variables. Les variables incluses sont les suivantes :

- **Run** : identifiant de l'expérience (entier),
- **Lieu** : site de prélèvement ou d'extraction (*Mostaganem ou Ghardaia*),
- **Période** : saison de la récolte (*printemps, été*),
- **Etat** : état de la matière végétale (*fraîche, sèche*),
- **La durée** : durée de l'extraction (*en heures*),
- **Sonication** : traitement par ultrasons (binaire : *Avec* ou *Sans*), à une puissance de 195 watt.
- **Rendement** : taux de rendement de l'extraction (%), exprimé sous forme décimale.

II.3.4.2 Traitement des valeurs manquantes ou aberrantes

Le jeu de données expérimentales ne contient aucune valeur manquante ou aberrante. Pour que les modèles intelligents produisent des résultats fiables et performants, il est essentiel que la base d'entraînement contienne un nombre suffisant et représentatif d'enregistrements. À cette fin, il est souvent nécessaire de recourir à une augmentation des données, en appliquant des techniques issues de la science des données telles que la duplication contrôlée, la synthèse d'observations, ou la génération artificielle de données à l'aide d'algorithmes. Le jeu de données enrichi présente certaines valeurs aberrantes susceptibles d'influencer négativement l'entraînement des modèles. Ces valeurs ont été identifiées par des techniques d'analyse exploratoire (visualisation, écarts statistiques) et traitées par suppression ou correction selon leur impact. Aucune valeur manquante n'a été détectée dans les attributs considérés, ce qui permet une exploitation directe des données après nettoyage.

II.3.5 Étapes à suivre pour appliquer un algorithme IA

Pour appliquer un algorithme d'intelligence artificielle, il est essentiel de suivre un processus structuré (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cela commence par la collecte et la préparation des données, incluant le nettoyage, l'encodage des variables et éventuellement la normalisation. Ensuite, on procède à la division du jeu de données en ensembles d'apprentissage, de test (et parfois de validation). L'étape suivante consiste à choisir et entraîner l'algorithme adapté (régression, classification, réseau de neurones, etc.), suivi de l'évaluation de ses performances à l'aide de métriques appropriées (R^2 , MAE, précision, etc.). Enfin, on peut ajuster les hyperparamètres, interpréter les résultats et, si nécessaire, réentraîner le modèle pour optimiser sa précision avant son déploiement éventuel.

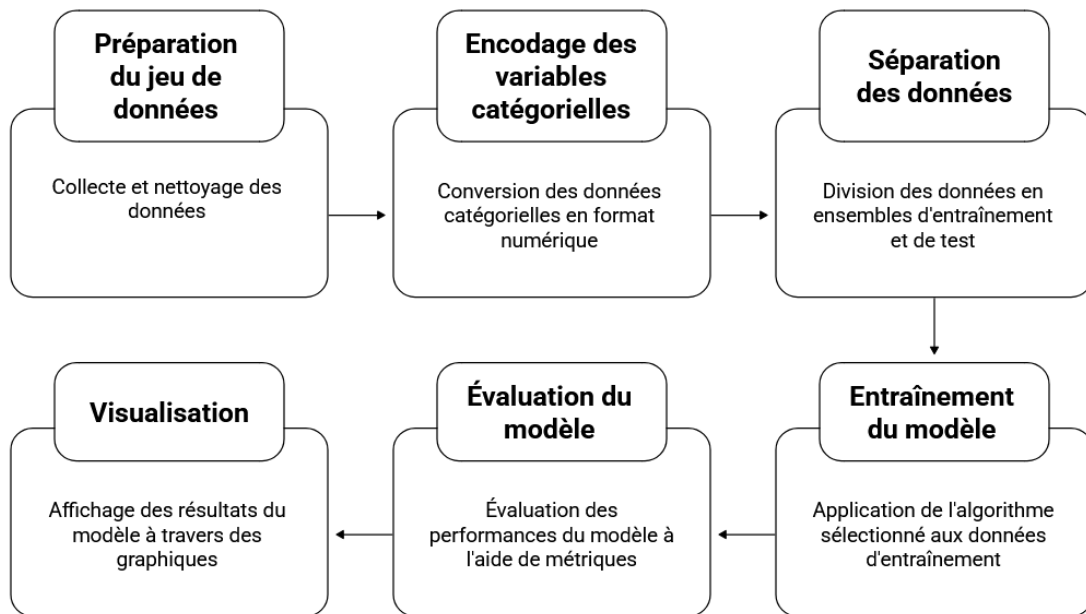


Figure II.4.Processus d'application d'une approche IA.

Chapitre III : matériel et Méthodes

Notre travail a été effectué au niveau du laboratoire de recherche « Technologie alimentaire et nutrition » de la faculté des Sciences de la Nature et de la Vie (SNV) de l'Université UMAB de Mostaganem.

Nous avons choisi de travailler avec l'eucalyptus (*Eucalyptus globulus*), car cette espèce végétale est abondante dans notre région et est connue pour sa richesse en HE et pour son fort potentiel antimicrobien, anti-inflammatoire, expectorant et mucolytique (bronchite, sinusite).

Les échantillons ont été récoltés au niveau de deux sites différents par leur situation géographique et leur climat ; Mostaganem, et Ghardaïa, à deux périodes différentes de l'année ; en début de printemps (mars) et en début d'été (juin).

III.1 Régions de récolte :

III.1.1 Mostaganem

La wilaya de Mostaganem est située dans le nord-ouest de l'Algérie et est caractérisée par un climat de type méditerranéen. Avec ses hivers doux et ses étés chauds, Mostaganem constitue un environnement propice au développement de l'eucalyptus. Ce type de plante, connue pour sa résistance à la sécheresse, résiste bien aux faibles précipitations estivales de la région. Grâce à ses racines ancrées en profondeur, elle est capable de l'eau en profondeur, ce qui fait d'elle une plante bien adaptée aux régions semi-arides. Si le sol est correctement drainé et légèrement acide ou neutre, l'eucalyptus peut y pousser sans problème.



Figure III.1. Carte représente le site de la récolte d'eucalyptus de la wilaya de Mostaganem.

➤ **Ghardaïa**

La wilaya de Ghardaïa, située dans le centre-sud de l'Algérie, dans la vallée du Mzab, elle est localisée dans une zone saharienne (Coordonnées : Environ 32°29'N, 3°40'E), où le climat est désertique chaud (BWh selon la classification de Köppen) caractérisé par une aridité extrême, de fortes amplitudes thermiques et une très faible pluviométrie. Pendant l'été (mai à septembre), la chaleur peut y atteindre des températures de 45 °C le jour, tandis qu'en hiver (décembre à février), les températures du jour varient entre 15°C à 20°C. Dans ces conditions des espèces telles que l'eucalyptus arrivent à s'adapter aisément. L'eucalyptus par son enracinement profond, est possédant la capacité d'absorber l'humidité présente dans le sol, ce qui lui confère la capacité de résister même sans précipitations fréquentes. En outre, il supporte bien les températures hautes, courantes dans cette région . Néanmoins, pour garantir un bon développement, un arrosage de base est indispensable, en particulier durant les premières années après la plantation. Par conséquent, même si Ghardaïa n'offre pas les conditions idéales pour toutes les espèces végétales, l'eucalyptus peut y prospérer à condition qu'il bénéficie d'un soutien hydrique approprié.

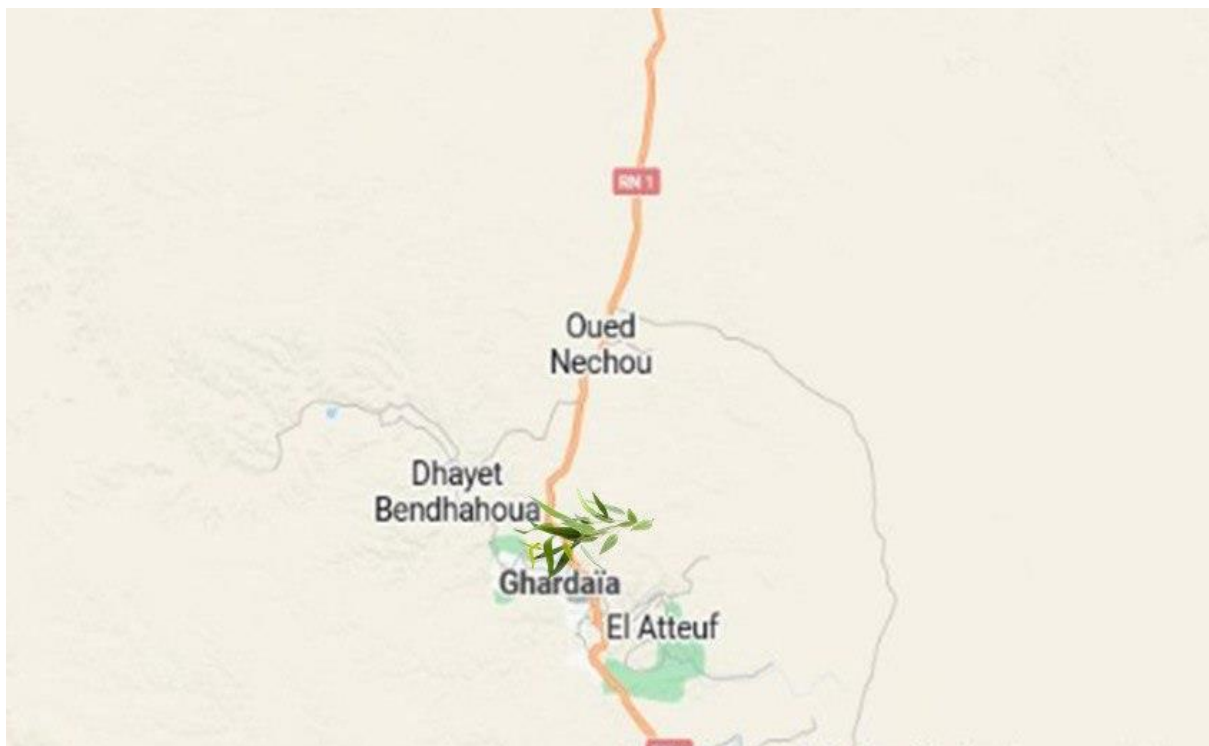


Figure III.2. Carte représente l'emplacement de la récolte à GHARDAIA

Nous avons effectué plusieurs essais, en maintenant le poids à 100g de la matière végétale, en variant le temps d'extraction entre 2 à 3 heures, la taille des feuilles (coupé, et totalement broyée), et l'état de la matière végétale (sèche et fraîche).

III.1.2 La méthode d'extraction choisie

Nous avons choisi l'hydrodistillation par le Clevenger, une méthode conventionnelle mais très efficace, simple et fiable, elle permet de séparer efficacement les composés volatils à l'aide de la vapeur d'eau sans l'utilisation des solvants.

La deuxième méthode que nous avons utilisée est une forme de l'hydrodistillation assistée par **les ultrasons**, mais pas en temps réel mais en passant par une étape de prétraitement ultrasonique.

III.1.3 Prétraitement avec les ultrasons (sonication)

Dans un flacon en verre fermée, ont été introduits 100g de feuilles d'eucalyptus séchées et broyées, ensuite on a introduit le flacon dans un bain d'ultrasons, de 10 minutes en 10 minutes

pendant 30 minutes, avec deux intervalles de 2 minutes, à une température de 28°C et a une fréquence 195Hz. L'application des ultrasons par intervalles de 10 minutes permet de limiter la montée en température, contrôler l'intensité de la cavitation, et suivre l'évolution du traitement. Cette méthode protège les composés sensibles, évite la formation d'émulsions, et optimise l'efficacité du prétraitement sans altérer la qualité de la matière végétale.



Figure III.3.Appareil de bain ultrasonique

III.1.3.1 Hydrodistillation avec le Clevenger

Après le bain d'ultrasons, la matière végétale a été introduit dans un ballon de 1 litre, rempli jusqu'au 2/3, relié au Clevenger au système de refroidissement enfin connectée au chauffe ballon. Lorsque l'eau entre en ébullition la vapeur de l'eau monte à travers Clevenger, puis subit le refroidissement ce que permet la séparation l'Hydrolat et l'huile essentiel. A la fin du procédé, l'huile obtenu est récupérée et stockée dans un flacon opaque, conservée à une température de 4°C. L'hydrolat est également récupéré et mis dans un flacon et conservé à une température de 4°C.

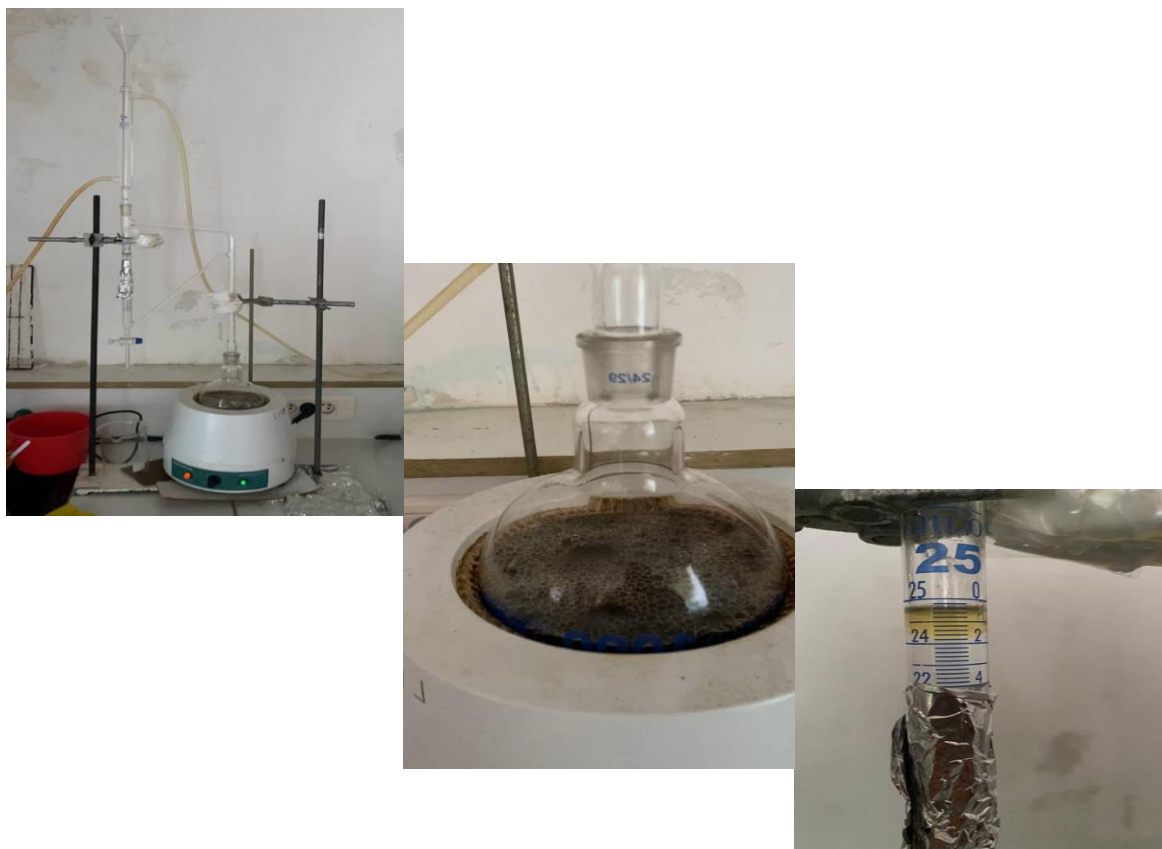


Figure III.4.Étapes de l'extraction par Hydrodistillation conventionnel Clevenger

III.2 Le rendement de HE

Le rendement de l'huile essentielle permet d'évaluer l'efficacité de la méthode choisie, il a été calculé en faisant le rapport entre la masse de l'huile essentielle obtenu, et la masse de la matière végétale, le tout multiplié par 100 comme suit :

$$\text{Rendement (\%)} = \text{Masse de HE} / \text{Masse de matière végétale} \times 100 \quad \text{III-1}$$

III.2.1 Le protocole de la micro capsulation par coacervation complexe

III.2.1.1.1 Matériel

- 2 Béchers ;
- 1 agitateur ;
- Le Thermomètre ;
- Pipette ;

- pH-mètre ;
- Filtre a café ;
- 2g de la gomme arabique ;
- 2g de gélatine végétale ;
- 1 microscope.

III.2.1.2 Étapes du protocole

1. Préparation de la solution des polymères

Nous avons dissolu 2g de la gomme arabique dans 50ml de l'eau distillée chaude (45°C), puis nous avons agitée, jusqu'à avoir une solution homogène, ensuite nous avons aussi dissolu 2g de gélatine dans 50ml chaude à 45°C de l'eau distillé.



Figure III.5.Solution des polymères(gomme arabique et gélatine végétale).

2. Mélange de la solution des polymères

Nous avons versé la gomme arabique dans la solution de gélatine, puis nous avons laissé mis sur l'agitateur de 15min a 45°C.

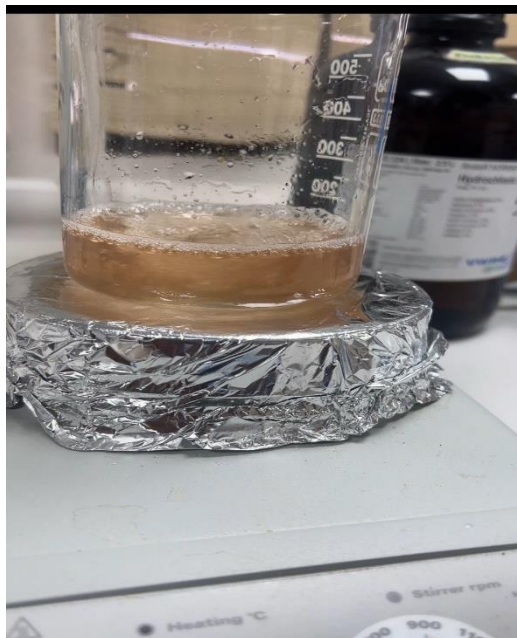


Figure III.6.Mélange de la solution des polymères

3. Ajouter HE et ajuster le pH

Nous sommes ajoutés, 5ml d'HE dans la solution des polymères, ensuite nous avons mesuré le pH et puis ajusté avec NaOH, jusqu'à 4.2.



Figure III.7.pH-mètre

III.3 Les analyses physico-chimiques

III.3.1 Indice de réfraction

L'indice de réfraction est un paramètre important qui donne une indication sur la pureté de l'huile essentielle. Des écarts significatifs par rapport aux valeurs de référence peuvent révéler une contamination, une adultération ou une altération de la qualité. Il a été déterminé par le réfractomètre à 29.1°C. Une goutte d'huile est placée sur la lame du réfractomètre, et puis la valeur est lue.



Figure III.8 . Le réfractomètre

III.3.2 Le pH

Pour mesurer le potentiel d'hydrogène, on a utilisé le papier pH.

Lorsqu'on plonge la bandelette dans l'échantillon, une réaction immédiate se produit entre les indicateurs et les ions présents, entraînant un changement de couleur. Cette couleur est ensuite comparée à une échelle standard fournie par le fabricant, permettant d'estimer la valeur du pH sur une échelle généralement comprise entre 1 et 14.



Figure III.9. Papier pH

III.4 Plans d'expérience

Nous avons maintenu constant 3 paramètres ; la masse de la matière végétale, et la température de l'ébullition de l'eau et la teneur en eau.

L'optimisation de l'extraction des huiles essentielles a été établie par l'hydrodistillation conventionnelle et assistée par les ultrasons des essentielles d'Eucalyptus globules. A été réalisée en utilisant un modèle mathématique, établi à l'aide du plan factoriel 2^5 . Ce modèle exprime la variation du rendement en huile en fonction des variables réduites de cinq paramètres accessibles expérimentalement, en l'occurrence, la région de récolte de l'espèce végétale, la période de récolte, l'état de l'espèce végétale, la durée de l'extraction, et avec ou sans les ultrasons. L'optimum de l'équation mathématique du modèle, déterminé par le logiciel design expert.

Les différents facteurs et leurs niveaux mentionnés dans le tableau II-1 ci-dessous :

Tableau III.1: Niveaux inférieurs $Z_{i,inf}$, de base $Z_{i,0}$, et supérieurs $Z_{i,sup}$ des paramètres

<i>Paramètres</i>	<i>Période</i>	<i>Lieu</i>	<i>État</i>	<i>Durée d'extraction(h)</i>	<i>Sonication</i>	<i>Codage (X_i)</i>
<i>Niveau inférieur, $Z_{i,inf}$</i>	<i>Été</i>	<i>Ghardaïa</i>	<i>Sèche</i>	<i>2</i>	<i>Sans</i>	<i>-1</i>
<i>Niveau supérieur $Z_{i,sup}$</i>	<i>Printemps</i>	<i>Mostaganem</i>	<i>Fraîche</i>	<i>3</i>	<i>Avec</i>	<i>+1</i>

Ces cinq paramètres indépendants, de nature et d'unités de mesure différentes, ont été remplacés par des variables réduites adimensionnelles, respectivement x_1 , variable réduite de la période de récolte, x_2 , variable réduite du lieu de récolte et x_3 , variable réduite de l'état de l'espèce végétale, x_4 , variable réduite de la durée de l'extraction, x_5 , variable réduite de la sonication. Les valeurs des variables réduites X_1, X_2, X_3, X_4 et X_5 évoluent dans un même intervalle, allant de -1 à $+1$. Le plan factoriel complet à deux niveaux des cinq paramètres prévoit, dans ce cas précis, 32 essais. Les conditions opératoires de ces essais programmés et

réalisés par la suite, ainsi que les rendements R_{HE} en huile obtenus sont regroupés dans le tableau II-2 suivant.

Tableau III.2 : Conditions opératoires des essais programmés par le plan factoriel des expériences²⁵ et rendements R_{HE} en huile obtenu

Lieu	Période	État	Durée d'extraction	Sonication(h)	Rendement (%)
-1	1	1	-1	1	0,16
1	1	-1	1	1	0,6
-1	-1	-1	1	-1	0,25
-1	-1	1	1	-1	0,11
-1	-1	-1	-1	1	0,95
1	1	1	1	1	0,91
1	1	1	-1	-1	0,38
1	1	1	1	-1	0,3
1	1	-1	1	-1	0,35
-1	1	-1	1	-1	0,48
-1	-1	1	1	1	0,09
-1	-1	-1	-1	-1	0,7
1	-1	1	1	-1	0,68
-1	1	1	-1	-1	0,55

-1	1	-1	1	1	0,82
-1	1	-1	-1	1	0,98
1	1	1	-1	1	0,6
-1	-1	1	-1	-1	0,07
1	1	-1	-1	-1	0,45
1	-1	1	-1	1	0,5
-1	1	-1	-1	-1	0,78
-1	1	1	1	-1	0,14
1	-1	1	-1	-1	0,71
1	-1	-1	-1	-1	0,4
1	-1	1	1	1	0,85
1	-1	-1	1	-1	0,68
-1	1	1	1	1	0,168
-1	-1	1	-1	1	0,22
1	-1	-1	1	1	1,2
1	-1	-1	-1	1	0,8
-1	-1	-1	1	1	0,75
1	1	-1	-1	1	0,56

III.5 Approches intelligentes choisies

III.5.1 Apprentissage automatique

III.5.1.1 Forêt aléatoire

L'algorithme Random Forest (forêt aléatoire) est une méthode d'apprentissage ensembliste qui combine plusieurs arbres de décision pour améliorer la robustesse et la précision des prédictions [50]. Chaque arbre est entraîné sur un sous-échantillon aléatoire des données (cf. Figure III.10).

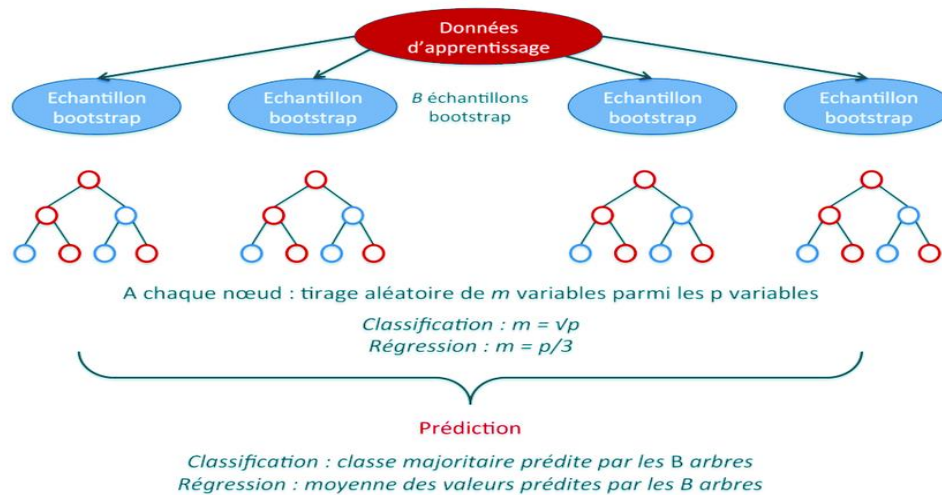


Figure III.10 .Principe de fonctionnement des forêts aléatoires

Caractéristiques principales :

- Fonctionne pour la régression ou la classification
- Chaque arbre apprend indépendamment
- Les prédictions sont agrégées :
 - moyenne des sorties pour la régression,
 - vote majoritaire pour la classification
- Réduction du surapprentissage grâce à la diversification des arbres

Pseudo-code – Random Forest pour régression

Entrée :

D : dataset original (features X et target y)

n_estimators : nombre d'arbres à construire

max_features : nombre de variables aléatoires à tester à chaque nœud

Sortie :

RF : modèle forêt aléatoire entraîné

Procédure RandomForestRegression(D, n_estimators, max_features) :

Initialiser RF ← liste vide

Pour i de 1 à n_estimators :

1. Tirer un échantillon bootstrap D_i de D (avec remplacement)
2. Construire un arbre de décision T_i sur D_i :
 - À chaque nœud, sélectionner aléatoirement max_features variables
 - Trouver la meilleure variable de séparation sur ces variables
 - Répéter jusqu'à atteindre les conditions d'arrêt (min_samples_leaf, max_depth...)
3. Ajouter T_i à RF

Retourner RF

Prédiction pour une nouvelle instance x :

1. Appliquer chaque arbre $T_i \in \text{RF}$ à x → obtenir une prédiction y_i
2. Retourner la moyenne de toutes les y_i (régression)

La méthode de la forêt aléatoire présente plusieurs atouts notables qui expliquent sa popularité en modélisation prédictive. Elle offre une bonne performance globale sans nécessiter de réglages

complexes des hyperparamètres, ce qui la rend accessible même aux utilisateurs non experts. Par sa structure fondée sur l'agrégation de plusieurs arbres, elle est naturellement robuste au bruit présent dans les données et résiste efficacement au surapprentissage (*overfitting*), un problème fréquent avec les modèles trop spécialisés. De plus, la forêt aléatoire gère bien les données manquantes, grâce à son mécanisme d'agrégation partielle qui peut s'appuyer sur des sous-ensembles disponibles. Enfin, elle fournit une évaluation directe de l'importance des variables, permettant d'identifier les facteurs les plus influents dans la prédiction, ce qui est particulièrement utile en phase d'interprétation ou de réduction dimensionnelle.

III.5.1.2 La régression linéaire

Dans le contexte moderne de l'apprentissage automatique (machine learning), la régression linéaire est considérée comme un algorithme d'intelligence artificielle supervisée [51]. La régression linéaire est une méthode statistique utilisée pour modéliser la relation entre une variable dépendante y et une ou plusieurs variables indépendantes x_1, x_2, \dots, x_n . Elle suppose que cette relation est linéaire, c'est-à-dire que la sortie peut être prédite comme une combinaison linéaire des entrées :

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n$$

où :

- \hat{y} est la valeur prédite,
- β_0 est l'ordonnée à l'origine (interception),
- β_i sont les coefficients associés à chaque variable explicative.

L'objectif de l'apprentissage est de trouver les coefficients β_i qui minimisent l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs réelles et les valeurs prédites.

Pseudo-code – Régression Linéaire

Entrée :

X : matrice des variables explicatives (n observations × m variables)

y : vecteur des valeurs cibles (rendement, par exemple)

Sortie :

β : vecteur des coefficients (incluant l'interception)

Procédure LinearRegression(X, y) :

1. Ajouter une colonne de 1 à X pour représenter l'interception ($X \leftarrow [1 \mid X]$)
2. Calculer β à l'aide de la formule analytique (moindres carrés) :

$$\beta = (X^t X)^{-1} X^t y$$

3. Retourner β

Prédiction pour une nouvelle instance x :

1. Ajouter 1 devant les x ($x \leftarrow [1, x_1, \dots, x_n]$)
2. Retourner : $\hat{y} = x \cdot \beta$

La régression linéaire est l'un des modèles les plus simples et les plus largement utilisés en modélisation prédictive supervisée. Elle présente l'avantage d'être rapide à entraîner, même sur des jeux de données volumineux, et facile à interpréter grâce à la signification claire des coefficients. Chaque coefficient indique la contribution linéaire d'une variable indépendante à la variable cible, ce qui en fait un outil utile pour analyser les relations entre variables. La régression linéaire est également robuste en présence de multitudes de variables numériques et constitue souvent un point de départ solide pour l'analyse exploratoire. De plus, son implémentation simple et son faible coût computationnel en font un modèle adapté aux

environnements contraints en ressources. Toutefois, elle repose sur l'hypothèse de linéarité, ce qui peut être une limite si les données présentent des relations complexes ou non linéaires.

III.5.2 Apprentissage profond

III.5.2.1 MLP – Multi-Layer Perceptron

Le perceptron multicouches MLP est un type de réseau de neurones artificiels, utilisé à la fois en apprentissage automatique et en apprentissage profond, selon sa profondeur (cf. Figure III.11) [52.]. Lorsqu'il comporte une seule couche cachée, le MLP est généralement classé dans l'apprentissage automatique classique. En revanche, lorsqu'il inclut plusieurs couches cachées, il devient un réseau de neurones profond, relevant alors de l'apprentissage profond (deep learning), il est structuré en plusieurs couches :

- une **couche d'entrée**,
- une ou plusieurs **couches cachées**,
- une **couche de sortie**.

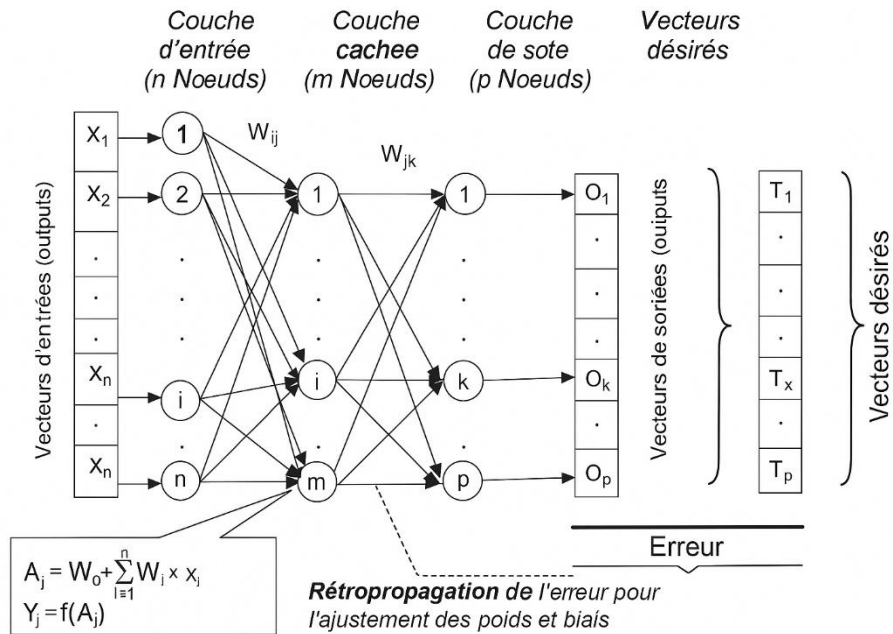


Figure III.11 : Principe de fonctionnement des MLP.

Chaque neurone dans une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante (réseau dense ou fully connected) (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le MLP peut modéliser des relations non linéaires complexes entre les variables d'entrée et la sortie, grâce à l'utilisation de fonctions d'activation non linéaires (comme ReLU ou sigmoïde).

Le MLP est couramment utilisé pour des tâches de régression, classification, ou même de prévision de séries temporelles.

Pseudo-code – MLP (Apprentissage supervisé)

Entrée :

X : matrice des variables explicatives (n observations × m variables)

y : vecteur des valeurs cibles (rendement, par exemple)

Sortie :

β : vecteur des coefficients (incluant l'interception)

Procédure LinearRegression(X, y) :

1. Ajouter une colonne de 1 à X pour représenter l'interception ($X \leftarrow [1 \mid X]$)
2. Calculer β à l'aide de la formule analytique (moindres carrés) :

$$\beta = (X^t X)^{-1} X^t y$$

3. Retourner β

Prédiction pour une nouvelle instance x :

1. Ajouter 1 devant les x ($x \leftarrow [1, x_1, \dots, x_n]$)
2. Retourner : $\hat{y} = x \cdot \beta$

Le MLP est un modèle d'intelligence artificielle particulièrement puissant pour résoudre des problèmes non linéaires. Contrairement aux modèles linéaires traditionnels, il est capable de capturer des relations complexes entre les variables, grâce à sa structure en couches multiples et à l'utilisation de fonctions d'activation non linéaires. Le MLP est également très flexible : il peut s'adapter à une grande variété de tâches (régression, classification, reconnaissance de formes), simplement en ajustant le nombre de couches et de neurones. De plus, il s'appuie sur des techniques d'apprentissage profond comme la rétropropagation de l'erreur, qui permet un ajustement automatique des poids en fonction de l'erreur prédite. Il est enfin facilement extensible (vers des architectures plus profondes ou spécialisées comme les CNN ou RNN), ce qui en fait un modèle fondamental dans l'IA moderne.

Chapitre IV : résultats et discussions

Ce chapitre représente les principaux résultats et leurs discussions issu de ce travail

Nous avons entamé notre recherche par une hydrodistillation, en recourant au soxlet sans l'utilisation de solvant organique, cependant, le rendement s'est avéré très faible, se situant entre 0.069 et 0.1725%. Cela est dû au fait que le soxlet a été configuré pour une extraction avec des solvants organiques. Après avoir terminé les essais avec le soxlet, nous avons opté pour le Clevenger, tout en intégrant également un prétraitement par ultrasons.

Nous avons varié plusieurs paramètres dans le but de tester leurs impacts sur le rendement de l'extraction

- L'origine géographique (Mostaganem et Ghardaïa).
- L'état de la matière (séchée ou fraîche).
- La durée d'extraction.
- Le prétraitement par sonication ou non.
- Le type de solvant.

Les rendements obtenus varient entre 0.18% et 1.2.

Nous avons utilisé le tableau II-2 comme matrice d'expérimentation

IV.1 Discussion des résultats

IV.1.1 Effet de la sonication

L'introduction de la sonication en tant que le prétraitement, nous a donné une amélioration significative dans le rendement d'extraction, avec une augmentation parfois supérieure à 60% :

- Mosta, 28/05/2025 (fraîche, 3h, avec sonication)-0.91%
- Mosta, 20/05/2025 (fraîche, 3h, sans sonication)-0.16%

Cela peut être, due à la rupture des structures végétales (cellules, parois et glandes à essence), que facilitent la libération de composés actifs.

- L'énergie ultrasonique génère de la chaleur. En interrompant le traitement toutes les 10 minutes, on permet à l'échantillon de refroidir légèrement, ce qui évite la dégradation thermique des composés sensibles (comme les monoterpènes).
- Un traitement continu trop long peut provoquer une cavitation excessive, ce qui risquerait de détruire les structures moléculaires ou même de former des émulsions difficiles à séparer. L'alternance améliore l'efficacité sans agresser la matière végétale.
- Travailler par paliers de 10 minutes permet aussi d'évaluer à chaque étape l'effet des ultrasons, et d'arrêter l'opération au bon moment si nécessaire.

IV.1.2 Effet de l'état de la matière première

L'état de la matière végétale a un impact important sur le rendement de l'extraction des huiles essentielles dans les conditions suivantes (une masse de matière de 100g, une température de 100°C), l'extraction par hydrodistillation assistée par ultrasons des feuilles de l'eucalyptus fraîche ont un rendement de 0,6% pour une durée d'extraction de 2 h, en revanche pour l'état sèche nous avons eu un taux de rendement de 0,8%, avec une amélioration de 0,2% ceci due à la superficie contact plus petite, plus est la diffusion de l'eau importante, cela permet d'avoir un bon rendement.

Le plus grand rendement a été constaté avec l'eucalyptus bien broyé.

IV.1.3 L'influence de la durée de l'extraction

Une durée d'extraction de 3h s'est révélée globalement plus favorable. Toutefois, au-delà d'un certain seuil, les rendements tendent à se stabiliser, cela prouve ce que plusieurs littératures affirment.

Une durée d'extraction très longue et une température élevée, rend le transfert de chaleur à la matière plus rapide, en revanche les températures très élevées peuvent engendrer la combustion des composantes thermosensibles.

IV.1.4 L'influence de provenance géographique

Le rendement de eucalyptus de Ghardaïa s'est révélé intéressants (jusqu'à 1.07), mais le HE de provenance de Mostaganem qu'a montré le plus élevée rendement, cela peut être liés à des facteurs pédoclimatiques, la richesse du sol ou la saison de la récolte.

IV.2 Meilleure condition identifiée

La condition optimale identifiée est la suivante : huile représentée sur la figure IV-1

Lieu : Mostaganem

État : Séché à température ambiante

Durée :3 heures

Solvant : eau distillée

Sonication : oui

Couleur : claire

Rendement obtenu :1.2%.

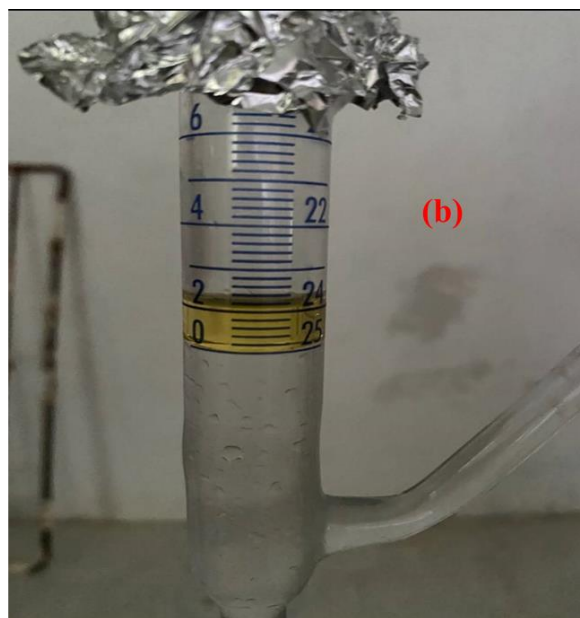


Figure IV.1 .(a) huile eucalyptus de MOSTAGANEM VS (b) huile eucalyptus de GHARDAIA

IV.3 Les analyses physico-chimiques de HE

Les indices de réfraction obtenus dans les différents échantillons vont de 1,520 à 1,558. Ce paramètre donne une idée sur la pureté de l'huile essentielle et aussi sur sa composition. Plus précisément, il peut indiquer si l'huile est riche en composés oxygénés ou hydrocarbonés. Par exemple, quand l'indice est élevé, comme 1,558, cela peut vouloir dire qu'il y a plus de composés lourds ou polaires. Au contraire, un indice plus bas, comme 1,520, peut montrer qu'il y a plus de composés légers, peut-être à cause de la sonication. Donc, on peut dire que la manière dont l'huile a été extraite (avec ou sans ultrasons, matière fraîche ou sèche) influence aussi cette valeur.

- L'échantillon de Mostaganem (frais, sans sonication) présente l'IR le plus élevé (1,558), ce qui peut indiquer une plus forte concentration en composés lourds ou oxygénés, souvent plus réfractifs.
- Les échantillons avec sonication (Mostaganem sec et Ghardaïa sec) présentent des indices de 1,540 et 1,520 respectivement. La sonication pourrait favoriser la libération de composés plus volatils, donc moins réfractifs. Ces variations suggèrent que le type de matière végétale (sèche/fraîche) et l'utilisation ou non des ultrasons influencent la qualité chimique de l'huile.

IV.4 pH

Tous les échantillons présentent un pH égal à 5, ce qui est légèrement acide, et correspond généralement au pH de l'hydrolat (et non de l'huile elle-même).

Cela indique que le milieu aqueux extrait avec l'huile (l'hydrolat) a un caractère faiblement acide, ce qui est conforme aux propriétés des hydrolats d'eucalyptus, connues pour leur légèreté et leur douceur.

Ces analyses montrent que la nature de la matière première (fraîche ou sèche), la région de récolte, et l'utilisation de la sonication influencent la qualité finale des extraits. L'indice de réfraction peut être utilisé comme paramètre de suivi de qualité dans un processus industriel, tandis que le pH stable autour de 5 suggère une bonne stabilité microbiologique de l'hydrolat.

IV.5 Etude comparative sur les rendements de l'extraction

Le tableau ci-dessous représente des travaux qui ont fait l'objet d'une extraction des huiles essentielle d'*Eucalyptus globulus* par hydrodistillation.

Tableau IV.1 .Etude comparative des principaux travaux sur l'HE

Auteurs	Espèce	Protocole expérimentale	Rendement (%)
MECHANI Mouna et al(2014)	<i>Eucalyptus camadulensis</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Récolté en Mai 2010 • 200g des feuilles sèches • Extraction par Clevenger • temp d'extraction 2h • Nort ouest de l'Algérie • Solvant : eau 	0,99
CHERIT Chahinez et al(2023)	<i>Eucalyptus Camadulensis</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ont été récoltés dans la région de Tissemsilt durant la période matinale vers 11h : 30min , en mars 2023. • Extraction par hydrodistillation 3-4h • Echantillon en petits morceaux 	0,26
KRAIFFI Fella et al(2020)	<i>Eucalyptus globulus</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ont été récolté dans la région de BISKRA 	0,76

		<ul style="list-style-type: none"> • Extraction par hydrodistillation 6h • 200 g broyé • Solvant : eau 	
KSOURI Samir et al(2020)	<i>Eucalyptus globulus</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Les feuilles ont été échantillonnées en Mars 2017 sur des arbres de territoire de la wilaya de Guelma, commune de Bouchegouf (Djebel Beni Salah), • Extraction par hydrodistillation • 100 g matière sèche • Solvant : eau 	2,43
Catia,S,D.oliviera et al()	<i>Eucalyptus globulus</i>	<p>Les feuilles ont été échantillonnées</p> <p>Portugal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Taille particules broyé entre 2-3mm • Extraction par hydrodistillation durée : 3h • Solvant : eau 	1,7
Fiker maria et al(2019)	<i>Eucalyptus globulus</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Influence de l'âge de l'arbre sur le rendement 	2,97(2ans) 3,89 (6ans)

		<ul style="list-style-type: none"> • Extraction par hydrodistillation pendant 3h • Seulement les feuilles (200 g broyées) • Age de l'arbre 2ans,8ans 	
Tshepo pheko-ofithile et al(2024)	<i>Eucalyptus globulus</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Extraction par hydrodistillation conventionnel • Hydrodistillation assistée par les ultrasons fréquence 50W • Hydrodistillation assistée par ultrasons fréquence 300W • Pays BOTSWANA 	2,20 2,24 2,5
Atmeni et BOA et al(2025)	<i>Eucalyptus globulus</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Espèce récolté la matinée dans deux régions • MOSTAGANEM • GHARDAIA • Extraction par hydrodistillation conventionnel • Hydrodistillation assistée par ultrasons • 100 g espèces (fraiche /sèche) • En morceaux et broyer 	1,2(Mostaganem ultrasons)) 0,98(GHARDIA ultrasons))

IV.6 Modélisation par la méthodologie de plans d'expérience

Pour modéliser les résultats expérimentaux nous avons opter à utiliser deux différentes méthodes pour choisir le protocole expérimental adéquat pour la production des huiles avec des

rendements importants, pour cela la méthodologie de plans d'expérience et intelligence artificielle ont fait l'objet de cette partie d'étude, les résultats obtenus sont présentés en dessous :

Les résultats de ce tableau III.2 montrent que le rendement en huile est très influencé par les conditions opératoires d'hydrodistillation.

La variation du rendement R_{HE} en huile a été exprimé par la fonction polynomiale du premier ordre en x_1, x_2 et x_3, x_4 et x_5 (4) :

$$R_{HE} = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{14}x_1x_4 + a_{15}x_1x_5 + x_{23}x_2x_3 + \dots + a_{123}x_1x_2x_3 + \dots + E \quad \text{IV-1}$$

L'équation du modèle mathématique obtenu s'écrit :

$$R_{HE} = 0.537 + 0.086X_1 - 0.022X_2 - 0.022X_3 - 0.137X_3 - 0.0135X_4 + 0.097X_5 - 0.0815X_1X_2 + 0.127X_1X_3 + 0.086X_1X_4 + 0.031X_1X_5 - 0.0123X_2X_5 + 0.0171X_3X_4 - 0.0629X_3X_5 + 0.0521X_4X_5 + \epsilon \quad \text{IV-2}$$

Les valeurs des coefficients de cette équation (VI-2) permettent d'évaluer l'influence sur le rendement en huile, des effets individuels de chacun des paramètres étudiés et de leurs interactions. On relève que l'effet simple de x_5 qui représente le mode d'extraction (conventionnel ou assisté par les ultrasons) sur le rendement est positif et prédominant par rapport aux effets linéaire de lieu, de récolte et l'état de l'espèce végétale, en ce qui concerne l'effet de la durée de l'extraction et la période de récolte sur le rendement sont négligeable, n'ont pas d'impact statiques sur la réponse (Rendement).

Parmi les effets conjugués des paramètres, les plus importants sont les interactions lieu-état et celui de lieu-durée. En revanche, le rendement en huile est très peu affecté par les interactions lieu-sonication, période-état, période-durée, période-sonication et aussi durée-sonication, ces termes de l'équation (IV.I) ont été négligés.

Le modèle mathématique corrigé s'écrit alors :

$$R_{HE} = 0.537 + 0.086X_1 - 0.022X_3 - 0.137X_3 + 0.097X_5 - 0.0815X_1X_2 + 0.127X_1X_3 + 0.086X_1X_4 + 0.0215X_2X_3 - 0.0298 X_2X_4 + -0.0629X_3X_5 + \epsilon \quad \text{IV-3}$$

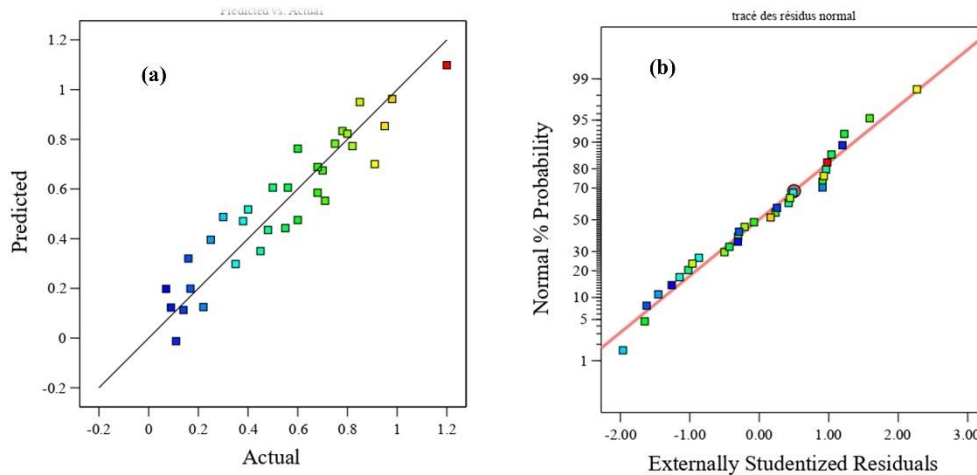


Figure IV.2 . (a) tracé des variables prédites VS expérimentale, (b) tracé des quantiles des résidus en distribution normale

La figure IV-2 (a) représente le tracé des variables prédites par le modèle de l'équation IV-3 en fonction des variables expérimentales issu des expérience ; on remarque que le modèle prédit ajuste bien le résultat expérimentale avec une erreur maximal de 8%. De plus la figures IV-2(b) représente des quartiles des résidus à ceux d'une distribution normale théorique ,sachant qu'un résidus représente l'écart entre les variables observés et les variables prédites par le modèle mathématique, les résidus soit normalement distribués, en raison que les quantiles des résidus sont alignés étroitement avec la ligne droite, ce qui nous permet d'étudier la signification et l'adéquation du modèle mathématiques.

IV.7 Validité du modèle mathématique

La validité de ce modèle corrigé a été vérifiée par le test de Fischer et confirmé par une évaluation statistique, effectuée à l'aide du logiciel Design-expert 13

L'analyse de la variance ANOVAS montre que le P-value du modèle mathématique est significative par le fait que $P\text{-value} < 0.05$ cela a permis de conclure que les facteurs d'effet linéaire comme lieu, état et la sonication ont des P-value très faible en comparant au seuil qui est 5%, ces variables ont des effets significatifs sur le rendement. En revanche, la période et la durée de l'extraction ne sont pas significatifs pour leur P-value supérieur au seuil de signification, De plus les interactions entre facteurs, on observe que seulement AB,AC,AD,CE sont significatifs ce résultat est confirmé par l'analyse de variance tableau IV-1

L'analyse mathématique de l'équation (IV.3) a montré qu'elle possède d'un point correspond au maximum de l'équation de coordonnées réelles [lieu :mosta,état, sèche, période :été, durée de l'extraction 3H, et avec sonication qui engendre un taux de 1.098% par prédiction.

Les essais réalisés dans les conditions opératoires, définies par ce point, ont fournis un rendement moyen en huile de 1,2%. Cette valeur du rendement est nettement supérieure à la valeur 1.098%, calculée à partir de l'équation (IV-3) du modèle. La différence observée nous a amené à conclure, d'une part, que le modèle mathématique n'est valable que dans le domaine expérimental et ne peut être extrapolé. Ce qui confirme que le modèle mathématique nécessite des modifications, Pour le coefficient de détermination on remarque bien que le R^2 égale à 0.87, signifie que seulement 87% de la variabilité qu'elle a été prédite, de plus la différence entre le R^2 prédit et ajusté est supérieure à 0.2 ce qui nous amène à dire que notre modèle nécessite une amélioration. Ce résultat nous a suggéré à rechercher un éventuel maximum du rendement en huile en dehors de ce domaine. A cet effet, nous allons dans le futur entrepris une recherche exploratoire, en utilisant une variante de la méthode du gradient, mise au point par les plans de surface de réponse.

Tableau IV.2 .Analyse de la variance

Source	Somme des carrés	Degré de liberté	Écart au carré	F-Value	P-Value	Signification
Model	2.42	15	0.1616	7.51	0.0001	Significatif
A-lieu	0.2367	1	0.2367	11	0.0044	Significatif
B-Période	0.0167	1	0.0167	0.7784	0.3907	Non significatif
C-état	0.581	1	0.581	27.01	< 0.0001	Significatif
D-la durée	0.0058	1	0.0058	0.2711	0.6097	Non significatif
E-sonication	0.3058	1	0.3058	14.21	0.0017	Significatif
AB	0.2126	1	0.2126	9.88	0.0063	Significatif
AC	0.5233	1	0.5233	24.33	0.0002	Significatif
AD	0.2401	1	0.2401	11.16	0.0041	Significatif
AE	0.032	1	0.032	1.49	0.2402	Non significatif
BC	0.0148	1	0.0148	0.6877	0.4192	Non significatif
BD	0.0283	1	0.0283	1.32	0.2681	Non significatif

BE	0.0048	1	0.0048	0.2232	0.643	Non significatif
CD	0.0094	1	0.0094	0.4363	0.5183	Non significatif
CE	0.1265	1	0.1265	5.88	0.0275	Significatif
DE	0.0869	1	0.0869	4.04	0.0616	Non significatif
Résiduel	0.3442	16	0.0215			
Cor Total	2.77	31				

Figure.VI.3 Représente les graphiques de iso réponses des interactions entre facteurs, d'où représente des points optimaux qui sont : période : été, lieu : Mostaganem, été : sèche, durée :3, et finalement hydrodistillation assistée par ultrasons

La différence entre le rendement expérimentale et réelle est d'un résidu égal à 0.102 avec une erreur relative maximale de :8%

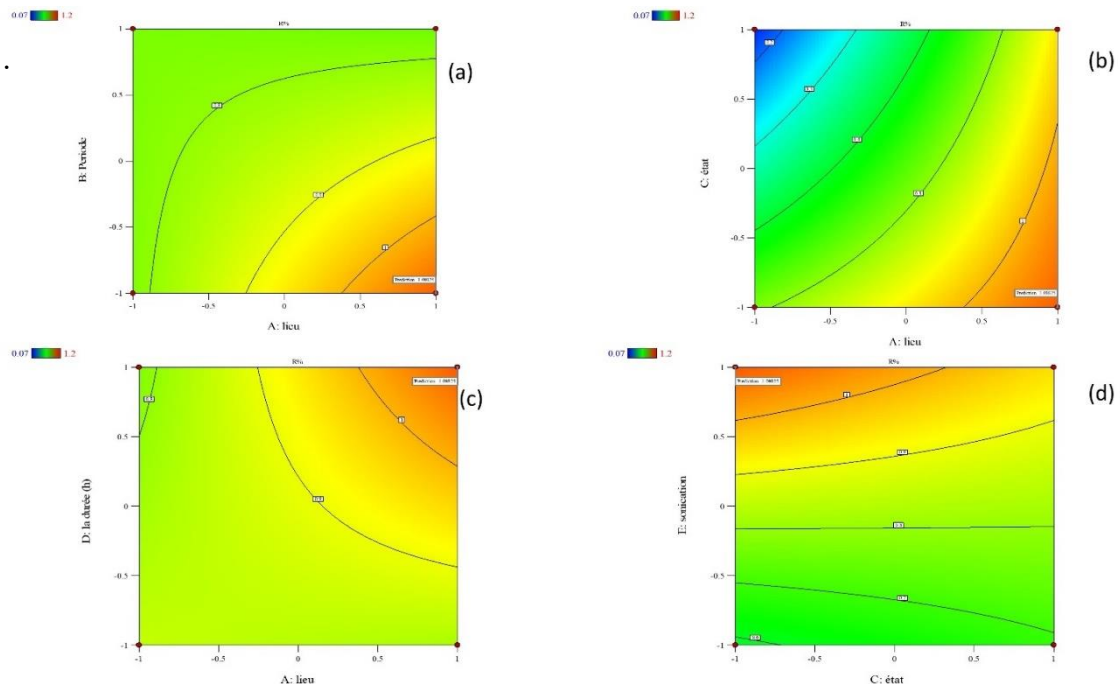


Figure IV.3.iso réponse de différentes interactions entre facteurs(a) AB,(b) AC,(d) CE,(c) AD,

IV.8 Modélisation par IA

IV.8.1 Formules d'évaluation des modèles :

IV.8.1.1 Coefficient de détermination (R^2)

Formule :

$$R^2 = 1 - [\Sigma(y_i - \hat{y}_i)^2] / [\Sigma(y_i - \bar{y})^2]$$

où :

y_i = valeur réelle

\hat{y}_i = valeur prédite

\bar{y} = moyenne des y_i

n = nombre total d'observations

Le R^2 mesure la proportion de variance expliquée par le modèle. Il est compris entre $-\infty$ et 1. Plus il est proche de 1, meilleur est le modèle.

IV.8.1.2 Erreur quadratique moyenne (RMSE)

Formule :

$$RMSE = \sqrt{[\Sigma(y_i - \hat{y}_i)^2 / n]}$$

où :

y_i = valeur réelle

\hat{y}_i = valeur prédite

n = nombre d'observations

Le RMSE mesure la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne. Plus elle est faible, plus les prédictions sont proches des valeurs réelles.

IV.8.1.3 Erreur absolue moyenne (MAE)

Formule :

$$\text{MAE} = \sum |y_i - \hat{y}_i| / n$$

où :

y_i = valeur réelle

\hat{y}_i = valeur prédite

n = nombre d'observations

La MAE mesure la moyenne des écarts absolus entre valeurs réelles et prédites. Moins sensible aux valeurs extrêmes que le RMSE.

IV.8.2 Random Forest

IV.8.2.1 Jeu de données expérimental

Les résultats obtenus à l'issue de l'entraînement du modèle Random Forest Regressor sur un jeu de 32 enregistrements révèlent une capacité modérée de prédiction. Le modèle atteint un coefficient de détermination **R² de 0,696**, ce qui signifie qu'il parvient à expliquer environ **70 %** de la variance observée dans les données de rendement. Ce score est globalement satisfaisant compte tenu de la taille relativement réduite du dataset. En revanche, la valeur élevée de l'erreur moyenne absolue en pourcentage (**MAPE**), qui s'élève à **54,1 %**, indique une variabilité importante entre les valeurs prédites et les valeurs réelles, ce qui réduit la précision absolue du modèle pour certaines observations. Ce décalage peut s'expliquer par une dispersion forte du rendement selon les combinaisons de facteurs, ou encore un sous-échantillonnage de certaines configurations expérimentales. Ces résultats suggèrent que le modèle capte des tendances globales, mais gagnerait en fiabilité avec un jeu de données plus riche et mieux équilibré.

IV.8.2.2 Meilleures interactions

La Tableau IV.3. Les meilleures interaction en Random Forest

et la Figure IV.4 présente les dix interactions de variables les plus influentes identifiées par le modèle Random Forest Regressor dans la prédiction du rendement d'extraction. Ces interactions combinent deux facteurs expérimentaux (comme le lieu, l'état de la plante, la période, la durée ou l'utilisation de la sonication), et sont classées en fonction de leur score R^2 , indiquant leur contribution individuelle à la performance prédictive du modèle. Par exemple, l'interaction entre le **lieu B et l'état frais** des échantillons obtient le score le plus élevé ($R^2 = 0,736$), suggérant qu'elle joue un rôle déterminant dans la variabilité du rendement. De même, d'autres combinaisons telles que **lieu A × sonication avec** ou **durée × sonication** montrent également une forte influence. Ces résultats mettent en évidence l'importance de considérer non seulement les effets simples des facteurs, mais aussi leurs interactions croisées, qui peuvent avoir un impact significatif sur les performances du modèle et sur la compréhension fine du procédé d'extraction.

Tableau IV.3. Les meilleures interaction en Random Forest

Interaction	R² Score
lieu_B × état_fraiche	0.736799
lieu_A × sonication_Avec	0.686866
lieu_A × période_été	0.632702
durée × sonication_Avec	0.624796
durée × sonication_Sans	0.619944
lieu_A × sonication_Sans	0.608758

période_printemp × sonication_Sans	0.606276
état_fraiche × sonication_Sans	0.593040
lieu_A × état_fraiche	0.589967
durée × lieu_B	0.588748

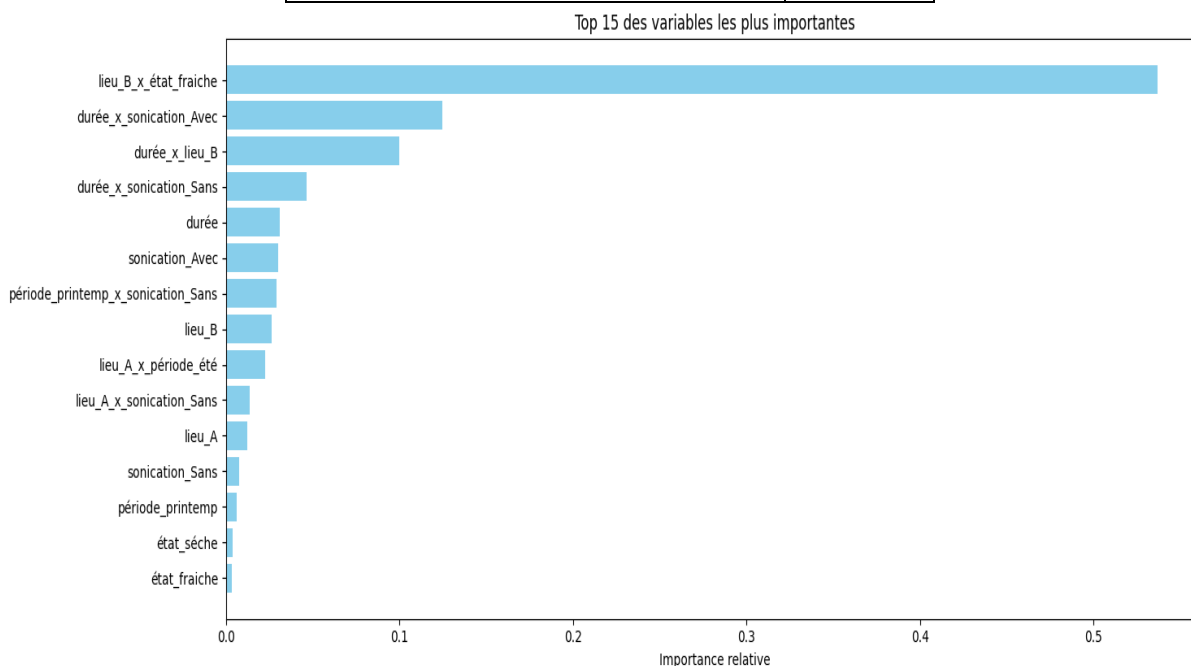


Figure IV.4.Importance relative des interactions en Random Forest

Interprétation des 3 premières interactions :

1. lieu_B_x_état_fraiche → $R^2 = 0.736$

- Selon le modèle, le fait que l'échantillon provienne de Ghardaia et soit dans un état frais est la combinaison la plus explicative du rendement en huile.
- Cela peut indiquer que les plantes récoltées à Ghardaia en état frais sont particulièrement efficaces pour l'extraction

2. lieu_A_x_sonication_Avec → $R^2 = 0.687$

- Les échantillons provenant de Mostaganem avec ultrasons semblent également offrir un bons rendements.
- Cela peut indiquer une synergie entre ce lieu et la méthode d'extraction assistée.

3. **lieu_A_x_période_été** → **R² = 0.633**

- Un lien fort entre le lieu de la récolté Mostaganem et la période estivale : les conditions d'été au lieu A peuvent favoriser la qualité des huiles extraites.

Le rendement n'est pas uniquement influencé par les variables isolées, mais fortement par des combinaisons spécifiques (interactions).

IV.8.2.3 Jeu de données augmenté

L'application du modèle Random Forest Regressor (RF) sur un jeu de données augmenté à 120 enregistrements a permis d'obtenir une distribution stable et cohérente des prédictions de rendement (cf.

Figure IV.5). Avec un jeu de données de 120 observations, le modèle Random Forest démontre d'excellentes performances prédictives, comme en témoignent les métriques suivantes :

- **R² de 0.9079** : Cette valeur proche de 1 indique que le modèle explique 90.8 % de la variabilité du rendement, confirmant une adéquation remarquable entre les prédictions et les données réelles.

- **MSE (0.00594) et MAE (0.04855) faibles** : L'erreur quadratique moyenne et l'erreur absolue moyenne sont très réduites, suggérant que les prédictions sont précises et proches des valeurs réelles. Ces résultats témoignent de la capacité du Random Forest à généraliser efficacement sur un volume de données plus important, en capturant les régularités tout en maintenant une stabilité prédictive. Cela renforce l'intérêt de l'augmentation de données comme atout principal pour améliorer la robustesse des modèles d'IA dans le cadre de procédés expérimentaux

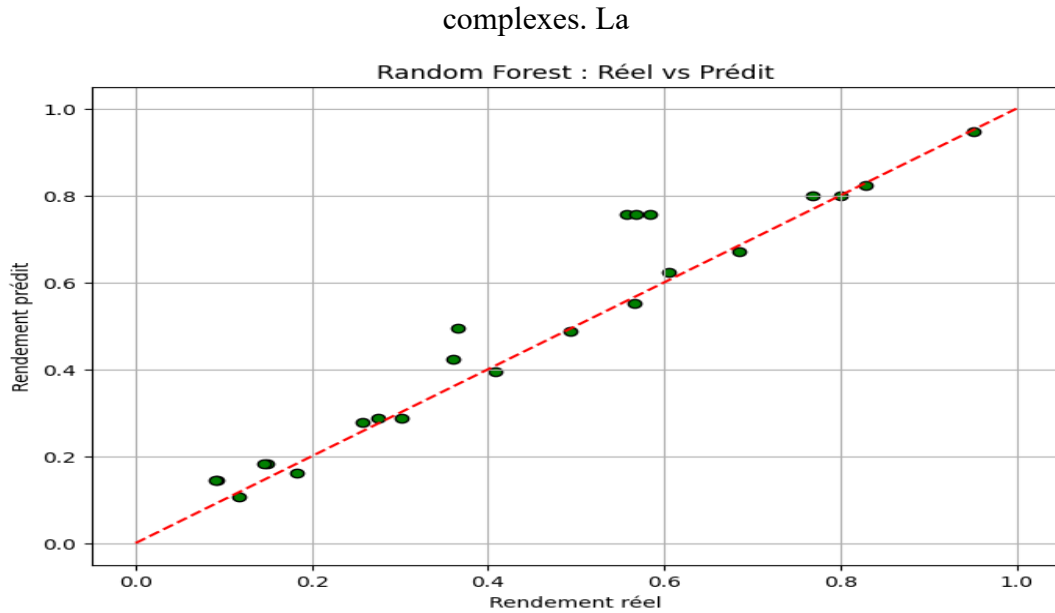


Figure IV.5 met en évidence cette corrélation forte : la majorité des points s'alignent autour de la droite idéale, avec des écarts minimes pour quelques observations. Les légères déviations observées (par exemple, quelques points dispersés aux extrémités) pourraient refléter des variations aléatoires ou des limites dans la généralisation du modèle pour des combinaisons extrêmes de paramètres.

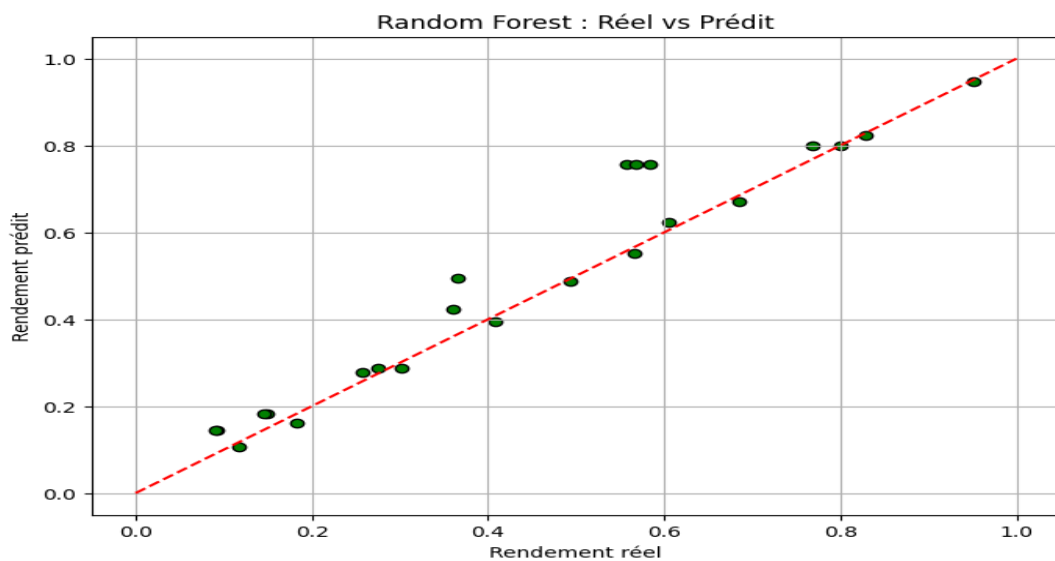


Figure IV.5 .Rendement Réel vs prédit RF, Dataset 120

La figure IV.5 représente la structure de l'arbre généré.

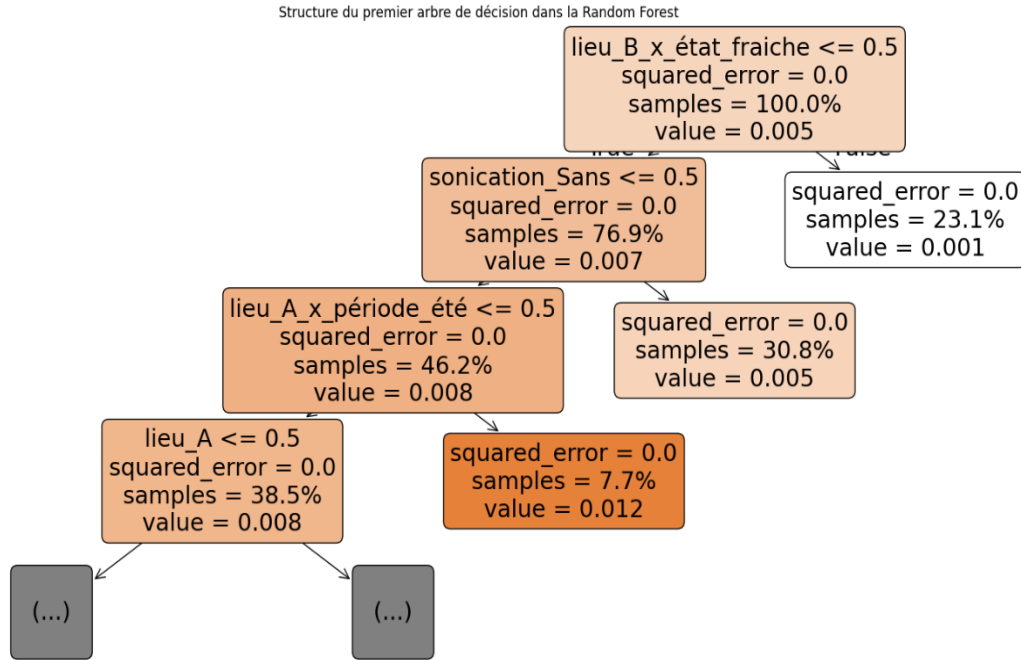


Figure IV.6 .Les sous arbres générés par application du Random Forest pour un jeu de données augmentés (120 enregistrements).

L'entraînement d'un modèle Random Forest Regressor sur le jeu de données synthétique "dataset_12000" a conduit à des performances remarquables, reflétant une capacité prédictive très élevée (cf. Figure IV.7, Figure IV.8, Figure IV.9). Le coefficient de détermination R^2 , évalué à 0,9948, indique que le modèle parvient à expliquer plus de 99 % de la variance totale du rendement, ce qui témoigne d'un excellent ajustement aux données. L'erreur quadratique moyenne (MSE) est extrêmement faible (0,00039), traduisant une précision fine et une très faible dispersion des prédictions par rapport aux valeurs réelles. De plus, l'erreur absolue moyenne (MAE) atteint 0,0157, ce qui signifie que les prédictions s'écartent en moyenne de seulement 1,57 % d'unité, ce qui est négligeable à l'échelle des rendements observés. Ces résultats démontrent non seulement la puissance du modèle Random Forest pour modéliser des relations complexes et non linéaires, mais aussi l'intérêt d'un jeu de données riche, varié et bien dimensionné pour obtenir des prédictions stables, précises et généralisables.

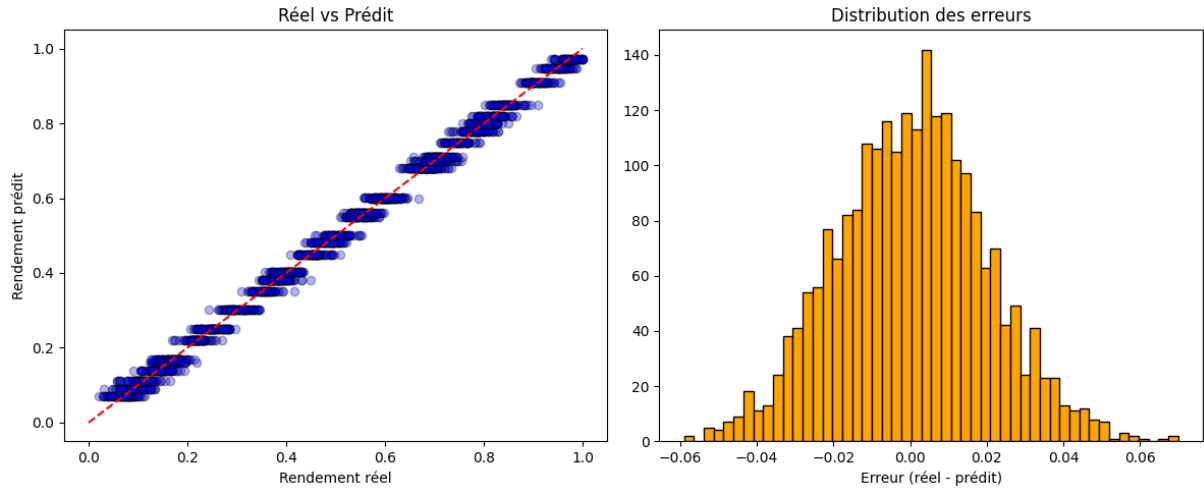


Figure IV.7. Rendement réel vs prédit RF (Dataset 12000) et distribution des erreurs

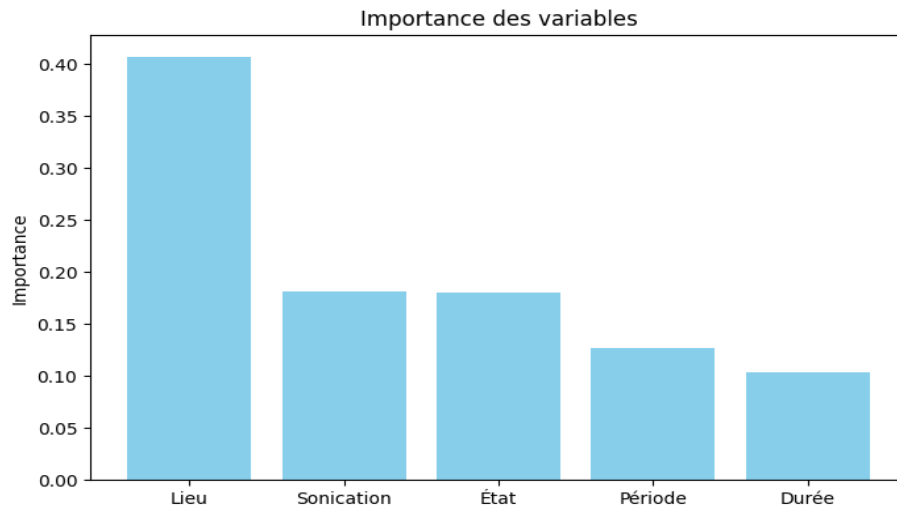


Figure IV.8 . Importance des variables RF (Dataset 12000)

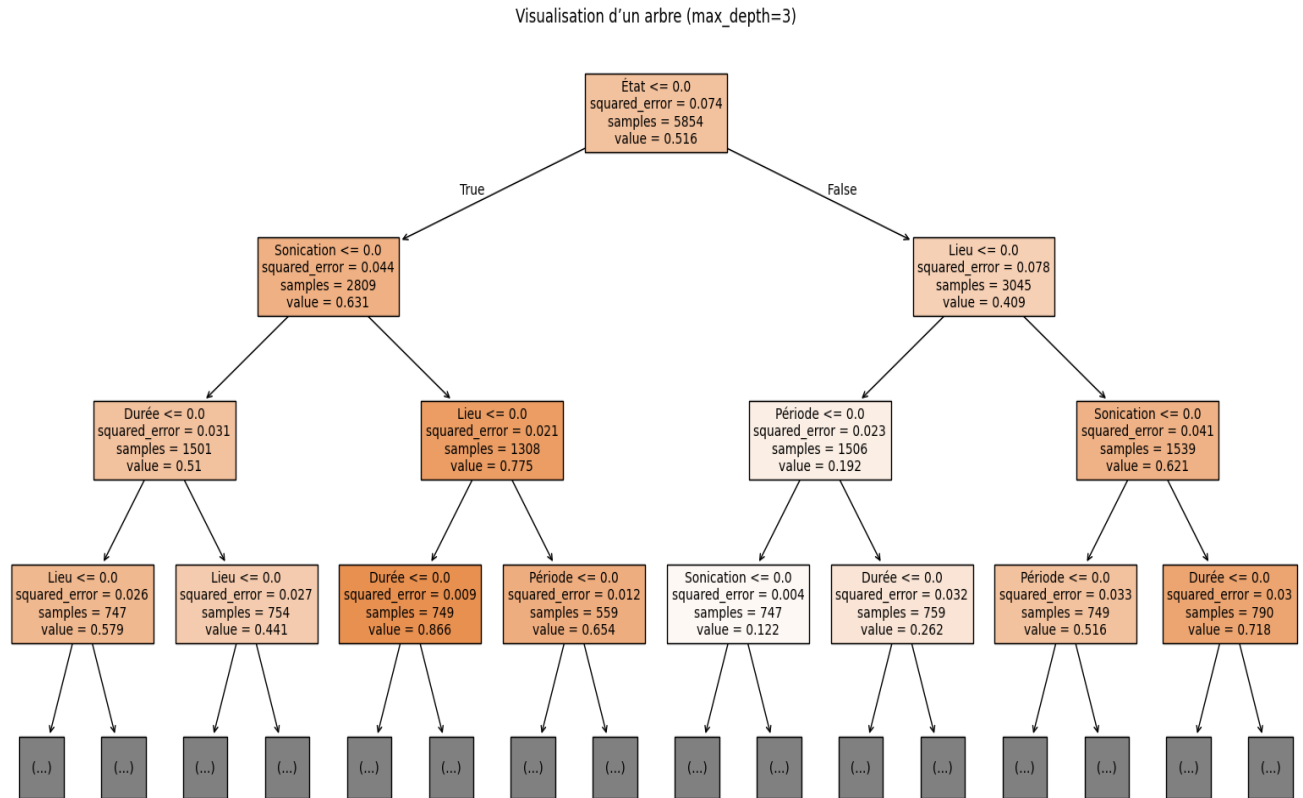


Figure IV.9 .Visualisation de l'arbre RF (Profondeur = 3) pour Dataset 12000

IV.8.3 Régression linéaire :

IV.8.3.1 Jeu de données expérimental

Le tableau ci-dessous présente les cinq interactions binaires les plus explicatives identifiées par un modèle de régression linéaire multiple appliqué au jeu de données. Ces interactions représentent des combinaisons spécifiques de deux variables expérimentales ayant une influence notable sur le rendement d'extraction. Par exemple, l'interaction **lieu B (Ghardaia × état frais)** obtient un coefficient de détermination partiel (R^2) de **0,737**, ce qui signifie que cette combinaison contribue fortement à expliquer la variation du rendement. Des interactions comme **durée × sonication avec** ou **lieu A (Mostaganem) × période été** révèlent également des liens linéaires importants.

Cependant, bien que ces interactions permettent d'améliorer le modèle en utilisant le jeu de donnée expérimental, les performances finales de la régression linéaire restent modérées, avec un R^2 global de **0,757**. Cela signifie que près de **76 %** de la variance du rendement est expliquée par le modèle. En revanche, la MAPE atteint **48,9 %**, ce qui indique une importante erreur relative moyenne sur les prédictions. Ce niveau d'erreur peut s'expliquer par la nature non linéaire des relations entre certaines variables ou par une hétérogénéité dans le jeu de données, que la régression linéaire ne parvient pas à modéliser correctement. Ces résultats soulignent l'intérêt potentiel de recourir à des modèles plus souples, comme les réseaux de neurones ou les forêts aléatoires, pour capturer des interactions plus complexes.

Tableau IV.4. Top 5 des interactions doubles selon le modèle de régression linéaire

Interaction	R² Score
lieu_B × état_fraiche	0.736799
lieu_A × sonication_Avec	0.686866
lieu_A × période_été	0.632702
durée × sonication_Avec	0.624796
durée × sonication_Sans	0.619944

IV.8.3.2 Jeu de données augmenté

L'application d'un modèle de régression linéaire sur un jeu de 1200 enregistrements augmentés a permis d'obtenir des performances globalement satisfaisantes (cf. Figure IV.10). Le coefficient de détermination R^2 , estimé à 0,790, indique que le modèle est capable d'expliquer environ 79 % de la variance totale observée dans les rendements d'extraction. Cela reflète une bonne capacité du modèle à capturer les tendances linéaires présentes dans les données. Par ailleurs, l'erreur absolue moyenne (MAE), qui s'élève à 0,1207, indique que les prédictions du

modèle s'écartent en moyenne d'environ 0,12 unité par rapport aux valeurs réelles. Ce niveau d'erreur, relativement modeste par rapport à l'échelle des rendements, témoigne d'une précision raisonnable, tout en laissant entrevoir une marge d'amélioration potentielle. Ces résultats montrent que la régression linéaire reste un modèle simple mais robuste, particulièrement efficace lorsque les relations entre variables sont proches de la linéarité.

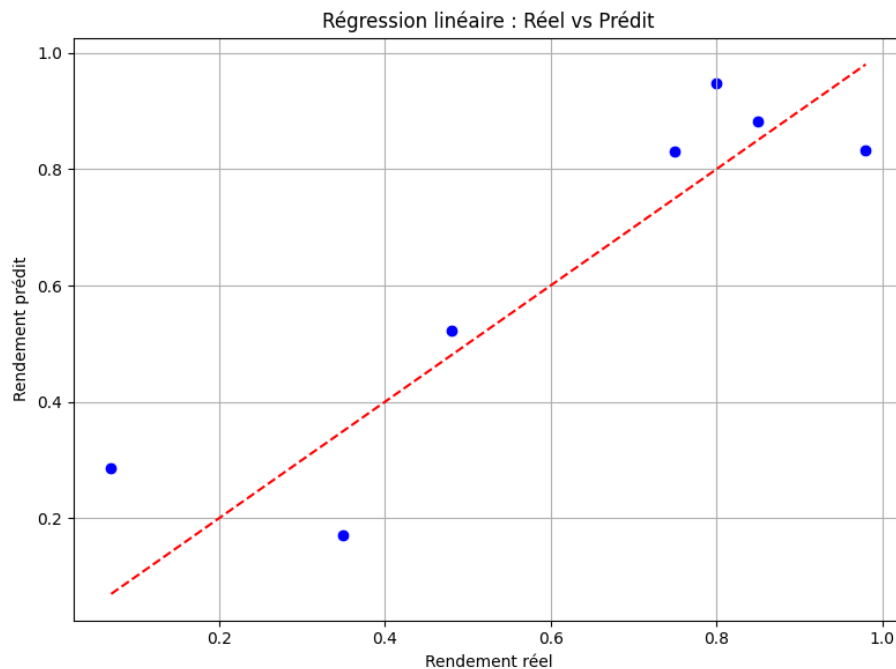


Figure IV.10 .Rendement réel vs prédit par l'algorithme de la régression linéaire

IV.8.4 MLP

Avec un jeu de données de 120 observations, le modèle **MLP Regressor** (perceptron multicouche) présente des performances nettement inférieures à celles du Random Forest (cf. Figure IV.11), comme en témoignent les métriques suivantes :

- **R² de 0.2360** : Cette valeur faible indique que le modèle n'explique que **23,6 % de la variabilité** du rendement, ce qui suggère une mauvaise adéquation aux données. Un R² proche de 0 signifie que le modèle ne capture pas correctement les relations entre les variables.

- **MSE élevée (0.04930)** : L'erreur quadratique moyenne est presque 10 fois plus grande que celle du Random Forest (0.00594), ce qui traduit des prédictions beaucoup moins précises.
- **MAE élevée (0.17163)** : L'erreur absolue moyenne est également 3,5 fois supérieure à celle du Random Forest (0.04855), confirmant une moins bonne performance globale.

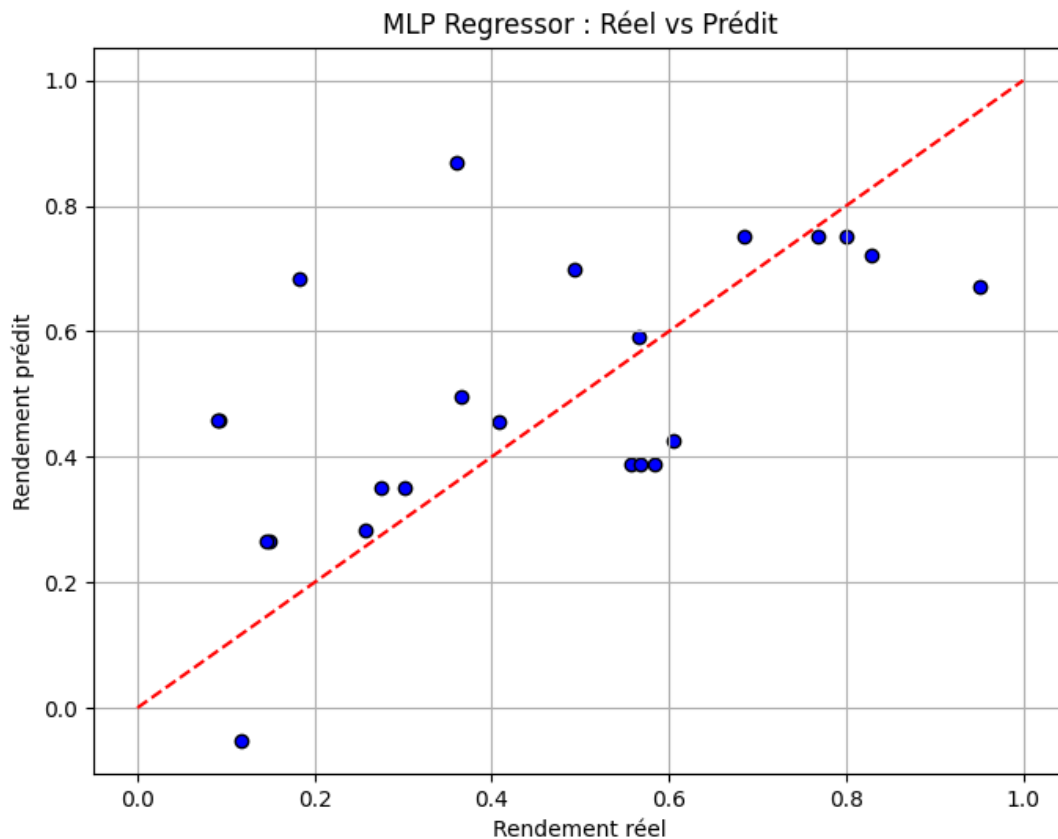


Figure IV.11. Rendement réel vs prédit MLP Regressor (120 observations)

IV.9 La Microencapsulation

L'image ci-dessous, confirment la réussite de la méthode utilisée pour la microencapsulation des HE, les microcapsules ont été vu à l'aide d'un microscope.

Les microcapsules sont réparties uniformément, avec un fort potentielle d'intégration dans la formulation de cosmétiques pour une libération contrôlée des actifs.



Figure IV.12 . Les microencapsulations des huiles

IV.10 Intensification des procédés

Bien que la méthode d'hydrodistillation assistée par ultrasons soit déjà utilisée dans plusieurs travaux de recherche, elle est généralement réalisée à l'aide d'un montage séparé, souvent peu pratique : le ballon est plongé manuellement dans un bain à ultrasons classique, sans contrôle précis des paramètres, et sans intégration directe avec le système de distillation.

Notre proposition consiste à intégrer directement le dispositif de Clevenger dans un bain à ultrasons programmable, avec contrôle de la température, du temps et de la fréquence des ultrasons. Ce système compact et contrôlable présente plusieurs avantages :

- Sécurité et stabilité du montage, évitant les risques liés aux montages artisanaux ou instables ;
- Contrôle précis des conditions d'extraction (fréquence, température, durée) pour une meilleure reproductibilité scientifique ;
- Gain de place et facilité d'utilisation dans les laboratoires de recherche ou dans des unités semi-industrielles ;

- Possibilité d'industrialisation ou de fabrication comme équipement pour startups ou petites industries cosmétiques et aromatiques.



Figure IV.13 .Le dispositif hydrodistillation assisté par ultrasons intensifier

Conclusion

Cette étude a démontré l'efficacité et la pertinence de l'intégration des **ultrasons** dans le processus d'extraction des huiles essentielles, offrant une alternative prometteuse aux méthodes conventionnelles. L'assistance ultrasonique a permis d'intensifier l'extraction, se traduisant par des rendements améliorés, des temps de traitement réduits et une consommation énergétique potentiellement moindre.

L'application rigoureuse de la **méthodologie des plans d'expérience** (DoE) a été cruciale pour comprendre l'influence des différents paramètres opératoires (tels que la puissance ultrasonique, le temps d'extraction, le ratio solvant/matrice, et la température) sur les performances d'extraction. Cette approche a permis d'identifier les facteurs les plus influents et de cartographier leur interaction, ouvrant la voie à une optimisation systématique.

En poussant l'optimisation plus loin, **l'intelligence artificielle** (IA), et plus particulièrement les techniques de modélisation prédictive et d'apprentissage automatique, ont joué un rôle déterminant. L'IA a permis d'analyser de vastes ensembles de données générées par les plans d'expérience, de prédire les conditions optimales pour maximiser le rendement et la qualité des huiles essentielles, et même de déceler des relations complexes non évidentes par les méthodes statistiques traditionnelles. L'intégration de l'IA a non seulement affiné les paramètres optimaux mais a également jeté les bases d'une approche plus prédictive et adaptative de l'extraction.

En somme, cette étude confirme que la combinaison synergique de l'extraction **assistée par ultrasons**, de **l'optimisation par les plans d'expérience** et de la **modélisation par l'IA**, et qui constitue une stratégie puissante pour le développement de procédés d'extraction d'HE plus **efficaces**, plus **durables** et plus **économiques**. Cette approche intégrée ouvre de nouvelles perspectives pour l'industrie des huiles essentielles, permettant une production à plus grande échelle avec une meilleure maîtrise des coûts et un impact environnemental réduit, tout en garantissant une qualité optimale du produit final.

Références Bibliographiques :

[1] FAO. (2012). L'état des ressources forestières mondiales – Rapport national : Algérie. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Disponible sur : <https://www.fao.org/documents/card/en/c/7d1a99b0-e6b6-44a6-bc4c-3dfb30f60b0c/>

[2] LAICHE, C. eddine, & MECHERI, M. (2023). Extraction des huiles essentielles et hydrolats [Carte]. <https://fac.umc.edu.dz/snv/bibliotheque/biblio/mmf/2023/Extraction%20des%20huiles%20essentielles%20et%20hydrolats.pdf>

[3] ZBALAH, H. & BELARBI, Y (2018). Effet de séchage des plantes médicinales de la famille des Lamiacées (Romarin) sur l'activité antibactérienne. <http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/6490/memoire%20final%202017.pdf?sequence=1&isAllowed=y> .

[4] BELKHIRI, F. Z. (2015). Etude de l'activités antibactérienne des huiles essentielles de *Rosmarinus officinalis* L. [Master's Thesis]. <http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/6601/1/BELKHIRI.pdf>

[5] C. Besombes, Contribution à l'étude des phénomènes d'extraction hydrothermomecanique d'herbes aromatiques. Applications généralisées, Thèse de doctorat, Université de la ROCHELLE, P 45, 2008

[6] AFNORNF T 75-006, huile essentielle. Association française de normalisation. Paris. pp559-563.

[7] Degryse A.C., et al., Risques et bénéfices possibles des huiles essentielles. Atelier santé environnement -IGS-EHESP, 87p,2008.

[8] Lawrence, B. M. (1992). Chemical components of Labiatae oils and their exploitation. *Advances in Labiatae science*, 399-436

[9] Lavoisier (1993), « BRUNETON J, » chez *Pharmacognosie, phytochimie, plantes médicinales*, Paris, Lavoisier, p. 623.

- [10] Samir H. (2009), Mise en évidence des huiles essentielles contenues dans les plantes *Pituranthos scoparius* et *Rhantherium adpressum* de la région de Ghardaïa, Ouargla : mémoire de magister.
- [11] Cavalli J. F. (2002) Caractérisation par CPG/IK, CPG/SMet RMN du carbone-13 d'huiles essentielles, Madagascar : Université de Corse Pascal Paoli.
- [12] RICHARD H. - Epices et aromates. Ed. dec et doc Lavoisier, collection science et techniques alimentaires, Paris, 339 p, 1992.
- [13] Richter, G. Métabolisme des végétaux. Physiologie et Biochimie. Ed. Presses Polytechniques et Universitaire Romandes, 322-323, 1993.
- [14] Smallfield, Introduction to growing herbs for essential oils, medicinal and culinary purposes. Crop & Food Research. Number 45, 4p, 2001.
- [15] Cowan M. M. Plant Products as Antimicrobial Agents. Clinical biology Reviews. 12 (4), 564–582, (1999).
- [16] Pibiri M.C. Assainissement microbiologique de l'air et des systèmes de ventilation au moyen d'huiles essentielles. thèse de Doctorat, Lausanne, Canada, p:177(2006).
- [17] J. Brunetton Elément de phytochimie et pharmacognosie, Paris : Lavoisier - Tech. & doc, p584, 1987
- [18] V. A. Kurkin, Chem. Nat. Compd, 39,123(2003).
- [19] www.wikipedia.org/wiki
- [20] L.S. Padua, N. Bunyaphatsara, R.H.M.J. Lemmens, Plant Resources of South-East Asia, p12 , (1999)
- [22] BRUNETON J. (1999) Pharmacognosie : Phytochimie ; Plantes médicinales, 3ème éd. Lavoisier Paris : Technique et Documentation et Editions médicales internationales, 1120 p(1993) .

- [23] Bouras, M. (2018) Thèse de Doctorat : Évaluation de l'activité antibactérienne des extraits de certaines plantes de l'est algérien sur des souches résistantes aux antibiotiques. Université Badji mokhtar-annaba.Algérie.
- [24] Kovats, E. (1965) Gas chromatographie characterisation of organics substances in the retention index system. *Advances in chromatography.*, Chapitre 7229-297.
- [25] Cependant, les temps de rétention peuvent varier légèrement d'une analyse à l'autre, notamment en raison du vieillissement des colonnes chromatographiques (Paolini J., 2005).
- [26] Paolini, J. (2005) Thèse de doctorat : Caractérisation des huiles essentielles par CPG/Ir, CPG/MS(IE/IC) et RMN du carbone 13 de *Citrus albidus* et deux *Asteraceae* endémique de corce *Eupatorium subsp Corsicum* et *Doronicum corsicum*. Italy.
- [27] Rai M.K., Acharya D. et Wadegaonkar P. Plant derived-antimycotics: Potential of Asteraceous plants, In: *Plant-derived antimycotics:Current Trends and Future prospects*, Haworth press, N-York, London, Oxford.165-185(2003).
- [28] Porter N. Essential oils and their production. *Crop & Food Research*. Number 39(2001).
- [29] ORANGES, R, PASSET, G. TEULADE. (1973). Les plantes médicinales à essences et chimiotaxonomie, 17ème journée de l'aromate lourd ,12 mai 1973.
- [30] M.-E. Lucchesi, « Extraction Sans Solvant Assistée par Micro-ondes » Conception et Application à l'extraction des huiles essentielles », phdthesis, Université de la Réunion, 2005. Consulté le: 13 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-00118895>
- [31] S. Abir, « Extraction par hydrodistillation des huiles essentielles de romarin », faculté des sciences et de la technologie* univ bba, 2024. Consulté le: 13 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <http://10.10.1.6:4000/handle/123456789/5456>
- [32] Akdim, L., 2017 ; « Comparaison de méthodes d'absorption et d'encapsulation de l'huile essentielle de *Copaifera Officinalis* L. en vue d'une application en cosmétique. Travail de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de master bioingénieur en Sciences agronomiques. Autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech, 54p.
- [33] Desai, K.G.H ., Park, H.J ., 2005.Recent developments in microencapsulation of food ingredients. *Drying Technol* 23: 1361–94.

- [34] Richard, J., Benoit JP. 2000. Microencapsulation. Tech. Ing. J 2210: 1–20.
- [35] Kerdudo, A 2014. Optimisation de la conservation des cosmétiques : impact de la formulation, recherche de nouveaux conservateurs naturels, encapsulation. Thèse pour obtenir le titre de docteur en Sciences de l'université de Nice – Sophia Antipolis CHIMIE, 232p.
- [36] Dias, D.R ., Botrel , D.A ., De Barros, F.R.V ., et Borges, S.V ., 2017. Encapsulation as a tool for bioprocessing of functional food, *Current Opinion in Food Science* 13: 31–37.
- [37] Thies, C., Preparation & chemical application, 1, 47-54, (1999).
- [38] Zeghouani, N., & Bentazir, D. (2022). Encapsulation de molécules biologiquement actives dans des systèmes complexes à base de biopolymères (Mémoire de Master). Université Frères Mentouri Constantine 1, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département de Biologie Appliquée, Spécialité : Biotechnologie et Biothérapie.
- [39] Goupy, J., & Creighton, L. (2009). Introduction aux plans d'expériences: avec applications. Dunod.]
- 40** Sahraoui, N., Abchich, H., & Mellal, M. (2016). Optimisation par plan d'expériences de l'extraction de l'huile essentielle du (Thymus pallescens). *International Journal of Scientific Research and Engineering Technology*, 85-93
- [41] Hadjloum, H., & Ould Ali, T. (2018). *Etude analytique et thérapeutique de l'huile essentielle de Laurus nobilis L. (Tigarsalt)* (Doctoral dissertation, UMMTO]
- [42] NAILI FATIMA, B. E. N. *Optimisation de l'extraction assistée par micro-ondes par plan d'expérience de l'ail*. 2020. Thèse de doctorat]
- [43] Ammar, A. H., Meniai, A. H., & Zagrouba, F. (2014). Experimental study and modeling of essential oil extraction from plants by hydrodistillation. *Chemical Engineering & Technology*, 37(7), 1235-1242

- [44] Nolan, Alistair. "Chapitre 1. La prochaine révolution de la production: principaux enjeux et propositions d'action." *La prochaine révolution de la production*. Éditions de l'OCDE, 2018. 21-73.
- [45] Dal Pont, Jean-Pierre, and Marie Debaq. *Les industries de procédés 2: Management industriel et révolution numérique*. Vol. 2. ISTE Group, 2020.
- [46] Mahboub, N., N. Slimani, and A. KHELIL. "Effet Des Differentes Modes De Sechage Sur Le Contenu Phenolique Et Biologique D'une Plante Spontanee A Caractere Medicinale Du Sahara Septentrional Algerien." *Revue des bio ressources* 12.1 (2022): 36-51.].
- [47] Eyraud, Rémi, and Stéphane Ayache. "Distillation of weighted automata from recurrent neural networks using a spectral approach." *Machine Learning* 113.5 (2024): 3233-3266.
- [48] Vasilache, Adriana, et al. "Classification of fermentation process models using recurrent neural networks." *International Journal of Systems Science* 32.9 (2001): 1139-1153.
- [49] Santana, Vinícius V., et al. "Optimal fragrances formulation using a deep learning neural network architecture: A novel systematic approach." *Computers & Chemical Engineering* 150 (2021): 107344.
- [50] Rigatti, Steven J. "Random forest." *Journal of Insurance Medicine* 47.1 (2017): 31-39..
- [51] Maulud, Dastan, and Adnan M. Abdulazeez. "A review on linear regression comprehensive in machine learning." *Journal of applied science and technology trends* 1.2 (2020): 140-147.]
- [52] Popescu, Marius-Constantin, et al. "Multilayer perceptron and neural networks." *WSEAS Transactions on Circuits and Systems* 8.7 (2009): 579-588.].
- [53] Grossberg, Stephen. "Recurrent neural networks." *Scholarpedia* 8.2 (2013): 1888.

Business Model Canvas

Thème : Optimisation de l'extraction des huiles essentielles d'eucalyptus, valorisation des déchets et micro encapsulation assistée par l'IA

1. Segment de clients

Clients individuels

- Consommateurs recherchant des produits naturels : produits traçables, locaux et respectueux de l'environnement.
- Personnes sensibles / santé naturelle : huiles essentielles pures pour aromathérapie ou usage personnel.
- Étudiants / chercheurs : échantillons pour études ou tests expérimentaux.
- Influenceurs bien-être : tests de produits différenciés, revue ou diffusion.

Clients entrepris

- Industrie cosmétique : actifs naturels, huiles encapsulées stables.
- Industrie pharmaceutique : extraits standardisés avec fiches techniques.
- Secteur agroalimentaire : arômes naturels, microencapsulés.
- Laboratoires de recherche : matières premières pour études.
- Distributeurs bio et boutiques spécialisées.

2. Relations clients

- Assistance personnalisée pour formulation.
- Service après-vente.
- Plateforme de suivi intelligent de la qualité.
- Support technique (chat, appels, emails...).

3. Canaux de distribution

- Site web.
- Salons scientifiques et industriels.
- Réseaux sociaux professionnels (Instagram, LinkedIn, etc.).

4. Proposition de valeur

- Appareil innovant pour l'extraction des huiles essentielles, combinant les ultrasons et chaleur douce pour maximiser le rendement et la qualité.
- Huiles essentielles 100 % naturelles et locales.
- Valorisation de résidus de l'extraction, comme fertilisant. Valorisation écologique des sous-produits (tiges, feuilles...).
- Stabilité prolongée des actifs grâce à la micro encapsulation.
- Réduction des pertes et amélioration du rendement, grâce à l'intensification des procédés.

5. Activités clés (Étapes de production)

1. Récolte et préparation
 - Récolte des feuilles.
 - Rinçage à l'eau distillée pour éliminer les impuretés.
2. Séchage et broyage
 - Séchage complet.
 - Broyage fin pour faciliter l'extraction.
3. Prétraitement par ultrasons (sonication)
 - 30 min à 38 °C pour améliorer la libération des principes actifs.
4. Extraction des huiles essentielles
 - Méthode : hydrodistillation par l'appareil Clevenger.

5. Analyse de la qualité des HE

- pH, densité, indice de réfraction, GC-MS.

6. Micro encapsulation

- Incorporation dans une solution avec agitateur.

7. Analyse de la stabilité

- Température, humidité, lumière, durée.
- Libération contrôlée des actifs.

8. Valorisation des déchets

- Tiges/fibres transformées en charbon actif (cosmétique, filtration...).

9. Commercialisation & partenariats

- Mise sur le marché des HE en capsules.
- Recherche de distributeurs, industriels, chercheurs.

6. Ressources clés

Ressources humaines

- Chercheurs et techniciens spécialisés en extraction et formulation.
- Biochimistes, ingénieurs en procédés, experts en IA.
- Équipe commerciale et marketing.
- Partenaires académiques ou professionnels.

Ressources financières

- Investissements initiaux (équipements, aménagement du laboratoire).
- Financements publics ou privés (subventions, concours, investisseurs).
- Revenus réinvestis dans la R&D et l'optimisation technologique.
- Budget dédié au marketing et à la distribution.

Ressources végétales

- Feuilles et tiges d'eucalyptus localement cultivés.
- Résidus végétaux valorisables (déchets secs, branches, fibres).
- Autres plantes complémentaires si élargissement du projet.

7. Partenaires principaux

- Agriculteurs locaux.
- Universités et centres de recherche.
- Marques cosmétiques ou pharmaceutiques.
- Startups technologiques (IA, bioinformatique...).
- Distributeurs bio.

8. Flux de revenus

Revenus directs

- Vente des huiles essentielles et hydrolats.
- Vente de l'appareil intensifiée extracteur 2 en 1.
- Vente de produits encapsulés.
- Formulation sur-mesure.
- Licences IA ou services d'optimisation.

Revenus indirects

- Vente de charbon actif (déchets valorisés).
- Vente de résidus de l'extraction comme fertilisant.
- Partenariats scientifiques ou industriels.

9. Structure des coûts

Coûts d'investissement

- Achat de machines : broyeur, sonicateur, Clevenger, GC-MS.
- Développement IA et plateforme numérique.
- Conception de l'appareil 2 en 1.
- Aménagement d'un laboratoire ou atelier.

Coûts d'exploitation

- Salaires du personnel.
- Consommables : plantes, solvants, eau distillée, gélifiants.
- Transport, communication, logistique.
- Maintenance des appareils.

Business Model Canvas		Conçu pour:	Conçu par:	Date:	Version:
<p>Partenaires clés Agriculteurs locaux. /Universités et centres de recherche. /Marques cosmétiques ou pharmaceutiques. /Startups technologiques (IA, bioinformatique...). /Distributeurs bio.</p>	<p>Activités Clés Récolte et préparation Séchage et broyage /Prétraitement par ultrasons (sonication)/Extraction des huiles essentielles/Analyse de qualité des huiles/Micro encapsulation/Analyse de la stabilité/Valorisation des déchets/Commercialisation partenariats</p>	<p>Propositions de valeur</p> <ul style="list-style-type: none"> Appareil innovant pour l'extraction des huiles essentielles, combinant les ultrasons et chaleur douce pour maximiser le rendement et la qualité. Huiles essentielles 100 % naturelles et locales. Valorisation de résidus de l'extraction, comme fertilisant. Valorisation écologique des sous-produits (tiges, feuilles...). Stabilité prolongée des actifs grâce à la micro encapsulation. Réduction des pertes et amélioration du rendement, grâce à l'intensification des procédés. 	<p>Relation Client</p> <ul style="list-style-type: none"> Assistance personnalisée pour formulation. Service après-vente. Plateforme de suivi intelligent de la qualité. Support technique (chat, appels, emails...). 	<p>Clients</p> <p>Clients individuels</p> <ul style="list-style-type: none"> Consommateurs bio et naturels Personnes sensibles / santé naturelle Étudiants / chercheurs Influenceurs bien-être <p>Clients entrepris</p> <ul style="list-style-type: none"> Industrie cosmétique Industrie pharmaceutique Secteur agroalimentaire Laboratoires de recherche Distributeurs bio et boutiques spécialisées. 	
<p>Coûts</p> <p>Coûts d'investissement : 19 600 000 DA Coûts d'exploitation : 20141455 DA</p>		<p>Revenus</p> <p>Revenus directs</p> <ul style="list-style-type: none"> Vente des huiles essentielles et hydrolats. Vente de l'appareil intensifiée extracteur 2 en 1. Vente de produits encapsulés. Formulation sur-mesure. Licences IA ou services d'optimisation. <p>Revenus indirects</p> <ul style="list-style-type: none"> Vente déchets valorisés comme charbon actif Vente de résidus de l'extraction comme fertilisant. Partenariats scientifiques ou industriels. 			

INVESTISSEMENT

		Année 01	Total Période
E Q U I P E M E N T S D E P R O D U C T I O N	Table de tri en inox	150 000	150 000
	Laveuse rotative ou a jets d'eau distillée	1 000 000	1 000 000
	égouttoir inox/ bac de vidange	200 000	200 000
	station/ recyclage eau distillée (uv +filtres)	500 000	500 000
	broyeur industriel a lames	750 000	750 000
	cuve a ultrasons industrielle	1 750 000	1 750 000
	cuve d'hydrodistillation a vapeur (inox)	3 500 000	3 500 000
	générateur de vapeur (électrique ou fuel)	2 000 000	2 000 000
	condenseur +essencier séparateur	1 000 000	1 000 000
	cuve de mélange (inox) + agitateur	1 500 000	1 500 000
	système de dosage pH (NaOH/ HCl)	400 000	400 000
	séchage (lyophilisation ou lit fluidisé)	3 000 000	3 000 000
	filtres + pompe de transfert	500 000	500 000
	emballageuse semi-auto pour flacons (5-50ml)	1 250 000	1 250 000
	capsuleuse	750 000	750 000
	étiqueteuse semi-auto	600 000	600 000
	cuves de stockage (inox)	750 000	750 000
	Matériel N°18	0	0
	Matériel N°19	0	0
	Sous-Total (01)	19 600 000,00	19 600 000

MASSE SALARIALE

	ETP	Total	
P E R M A N E N T S	Poste N°01	1,00	0
	Poste N°02	0,00	0
	techniciens en extraction	3,00	2 476 800
	ouvrier	3,00	1 360 855
	secrétaire	2,00	756 000
	femme de ménage	2,00	604 800
	recolteur	4,00	2 568 000
	Poste N°08	0,00	0
	Poste N°09	0,00	0
	Poste N°10	0,00	0
	Sous-Total (2)	7 766 455	




CHARGES EXTERNES

	Libellé	Total
C h a r g e s e x t e r n e s	Sous-traitance	1000000
	Loyers	960 000
	Energie/eau/gaz	600 000
	Frais Marketing	500 000
	Honoraires d'avocat	80 000
	Honoraires du Notaire	80 000
	Honoraires d'expert-comptable	300 000
	Honoraires Commissaire aux Comptes	130 000
	Frais du transit	-
	Frais télécom	25 000
	Divers fournitures	50 000
	Frais de formation	100 000
	R&D	-
	Sous-Total (04)	3 825 000,00

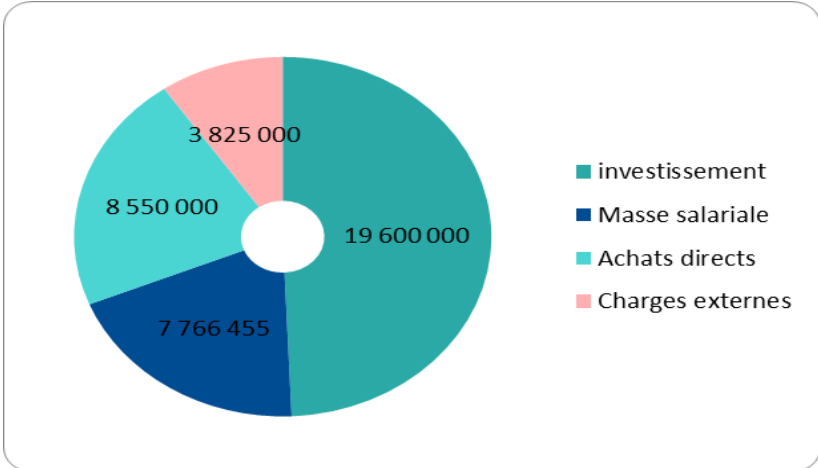
Achat directs

	Prestation	Total
A c h a t s d i r e	Produit/Service N°01	2 160 000
	Produit/Service N°02	1 440 000
	Produit/Service N°03	2 700 000
	Produit/Service N°04	750 000
	Produit/Service N°05	1 500 000
	Sous-Total (03)	8 550 000

SYNTHESE

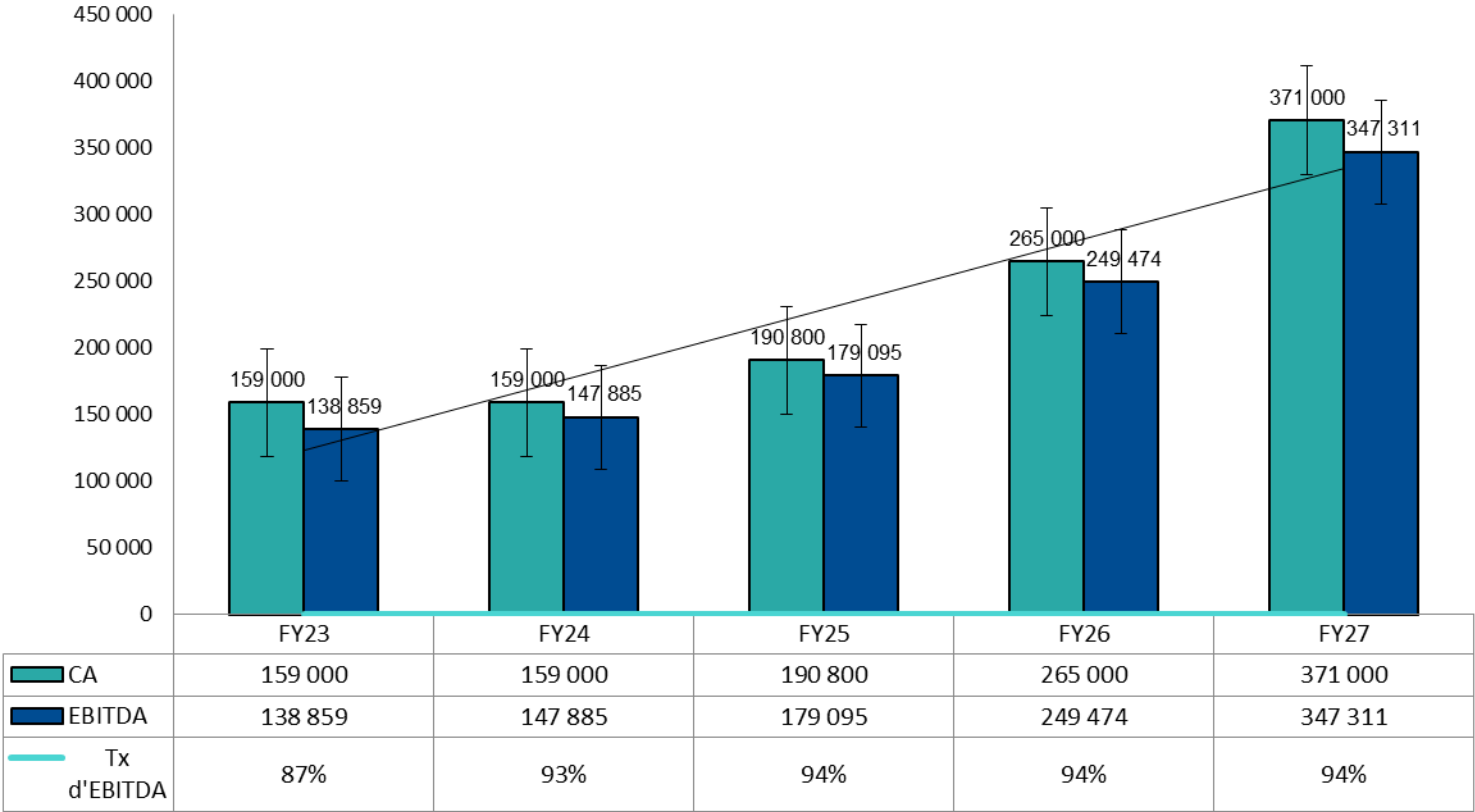
Catégorie	Montant
 investissement	19 600 000
 Masse salariale	7 766 455
 Achats directs	8 550 000
 Charges externes	3 825 000
	39 741 455

49%
20%
22%
10%



KPI Financiers

	FY23	FY24	FY25	FY26	FY27
CA	159 000	159 000	190 800	265 000	371 000
EBITDA	138 859	147 885	179 095	249 474	347 311
Tx d'EBITDA	87%	93%	94%	94%	94%
FCF	117 834	147 885	178 955	249 064	346 761



CA EBITDA Tx d'EBITDA Linéaire (CA)

