

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

École Nationale Polytechnique – Alger
Département de Génie Chimique
Laboratoire de Valorisation des Énergies Fossiles

Projet de Fin d'Etudes

Thème

Potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans les unités mobiles d'extraction des huiles végétales

Dirigé par :

Pr. E-H Benyoussef

Présenté par :

BACHA Kenza
TCHEKIKEN Chahinez

Soutenu le 1^{er} juillet 2010 devant le jury composé de :

Pr. C-E Chitour.Président
Pr. F .DerricheExaminatrice
Pr. S. CharchariExaminatrice
Pr. E-H Benyoussef.Rapporteur

Promotion 2010

Remerciements

Nous tenons à remercier :

Le Professeur E-H Benyoussef pour la confiance qu'il nous a faite en nous attribuant ce sujet mais aussi pour ses conseils précieux, sa compréhension et ses encouragements sans lesquels ce travail n'aurait pas pu aboutir.

Le Professeur C-E Chitour qui nous a fait l'honneur de présider le jury.

Les Professeurs F. Derriche et S. Charchari qui ont accepté d'examiner notre travail.

Monsieur H. Bennour pour l'aide précieuse qu'il nous a apportée.

Merci à notre Chef de Département Madame F. Mohellebi ainsi qu'à tous les enseignants de l'ENP qui ont participé à notre formation.

Dédicaces

À mes parents qui n'ont pas cessé de me soutenir tout au long de ce travail,

*À ma sœur Fahima, mon frère Yazid et mon frère Fawzi qui ne peut être
présent ce jour,*

À la mémoire de ma tante Khadidja,

À ma chère binôme Kenza avec qui j'ai eu le plaisir de partager ce travail,

À ma chère amie Sihem qui m'a aidée à décompresser durant ce travail,

À toi Selmen,

À Missoum, Wissem et Billal,

À tous mes amis.

Chahinez.

Dédicaces

À mes parents, À ma famille, À mes amis ;

À ma binomette

À tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail...

Kenza

ملخص / Abstract / Résumé

الموضوع: قابلية إدماج الطاقات المتجددة في الوحدات المتنقلة لاستخلاص الزيوت النباتية .
ملخص:

تهتم هذه الدراسة بتصميم وحدة متنقلة ذات وظائف متعددة: استخلاص الزيوت الأساسية بالتقطير البخاري، الاستخلاص بالمذيبات واستخلاص زيت الزيتون بالعصر.

تعمل هذه الوحدة على مدار العام وتعالج أنواع مختلفة من المواد النباتية بفضل تنوع تقنياتها.

إن الوحدة تستخدم كمصدر للطاقة الكتلة الحيوية لإنتاج الطاقة الحرارية والميكانيكية و وحدات الطاقة الشمسية لتوليد الطاقة الكهربائية. تعتبر لذلك مستقلة فيما يخص الطاقة ، وبالتالي تساهم في عدسة التنمية المستدامة.

تبين الدراسة التقنية والاقتصادية أن الوحدة يمكن تحقيقها تقنيا وهي مجدية اقتصاديا ، ويمكن أن تكون نموذجا مثاليا لأية صناعة تولد النفايات من أصل نباتي.

الكلمات المفتاحية

وحدة متنقلة- استخلاص الزيوت الأساسية - استخلاص الزيوت النباتية – الطاقات المتجددة - الكتلة الحيوية- وحدات الطاقة الشمسية- التنمية المستدامة –اقتصاد الطاقة- اقتصاد الماء –المبرد الهوائي- المذيبات- مبادل حراري – محرك تربين- المعصرة

Thème : Potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans les unités mobiles d'extraction des huiles végétales

Résumé

Cette étude porte sur la conception d'une unité mobile ayant plusieurs fonctions : l'extraction des huiles essentielles par entraînement à la vapeur d'eau, l'extraction par solvant volatil et l'extraction de l'huile d'olive par pression.

De par sa diversité l'unité peut fonctionner tout au long de l'année et traiter différents types de matière végétale.

L'unité utilise comme source d'énergie la biomasse pour produire de l'énergie thermique et mécanique; le photovoltaïque pour générer de l'électricité. Elle est de ce fait autonome en énergie et en eau, s'inscrivant ainsi dans l'optique du développement durable.

L'étude technico économique montre que l'unité est technologiquement réalisable, économiquement viable, et peut constituer un parfait exemple pour toute industrie générant des déchets d'origine végétale.

Mots- Clés :

Unité mobile - Extraction d'huiles essentielles –Extraction des huiles végétales- Énergies renouvelables -Biomasse –Solaire photovoltaïque –Développement durable- Économie d'énergie -Économie d'eau - aérocondenseur -Solvants volatils- Échangeur de chaleur – Turbine à gaz – Presse

Topic: Integration Potential of the renewable energies in mobile units extraction of vegetable oil**Abstract**

This study focuses on the design of a mobile unit with several functions: extraction of essential oils by steam distillation of water, extraction by volatile solvents and extraction of olive oil by pressure.

Because of its diversity, the unit can operate throughout the year and treat different types of plants.

The unit uses biomass to produce thermal and mechanical energy and photovoltaics to generate electricity. It is therefore autonomous of energy and water, thus contributing to the sustainable development.

The technical and economical study shows that the unit is technologically realizable, economically viable, and can be a perfect example for any waste generating industry of plant origin.

Key Words:

Mobile extraction unit- Essential oils - Renewable energy - Biomass - Solar photovoltaic - sustainable development - Energy saving- Water saving -Vacuum steam condenser - Solvent- Heat exchanger- Gas turbine - Press

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Partie I: Généralités

Chapitre 1: Les huiles essentielles et végétales

A. Les huiles essentielles	2
I. Définition d'une huile essentielle	2
II. Utilisations des huiles essentielles	2
III. Propriété d'une huile essentielle	2
III.1. Propriétés organoleptiques.....	2
III.2. Propriétés chimiques.....	2
III.3. Propriétés physiques	3
IV. Procédés d'extraction des huiles essentielles.....	3
IV.1. Extraction par hydrodistillation	3
IV.2. Extraction par entraînement à la vapeur d'eau	4
IV.3. Hydrodiffusion.....	5
IV.4. Extraction par expression	5
V. Stockage et conservation des huiles essentielles	5
B. Les huiles végétales	6
I. Définition des huiles végétales	6
II. Composition des huiles végétales	6
III. Propriétés des huiles végétales.....	7
III.1. Propriétés organoleptiques.....	7
III.2. Propriétés physiques	7
III.3. Propriétés chimiques.....	7
III.4. Propriétés biochimiques.....	7

IV.	Utilisation des huiles végétales	8
V.	Procédé de fabrication des huiles végétales	9
V.1.	Trituration des graines	9
V.1.1.	Extraction par pression	9
V.1.2.	Extraction par solvant	10
V.2.	Raffinage de l'huile	11
VI.	Conservation et stockage des huiles végétales.....	12

Chapitre 2: L'huile d'olive

I.	L'olivier	13
II.	Définition et classification de l'huile d'olive.....	13
II.1.	L'huile d'olive vierge.....	13
II.1.1.	L'huile d'olive vierge propre à la consommation.....	13
II.1.2.	L'huile d'olive vierge non propre à la consommation.....	14
II.2.	L'huile de grignons d'olive	14
III.	Composition Chimique de l'huile d'olive.....	14
IV.	Procédés d'extraction de l'huile d'olive	15
IV.1.	Les unités de trituration qui sont équipées de presses	15
IV.2.	Les unités de trituration qui sont équipées en chaînes continues	17
V.	Traitement des résidus de l'opération	19
V.1.	Traitement des margines.....	19
V.2.	Traitement des grignons	19
V.2.1.	Traitement des grignons humides	19
V.2.2.	Traitement des grignons dénoyautés gras	19
V.3.	Traitement des restes végétaux et terreux.....	19

Chapitre 3: Les équipements

A.	Les presses	20
I.	Presses pour procédés discontinus.....	20
I.1.	Presses Marseillaises	20
I.2.	Presses Anglo-américaines	20
I.3.	Presses à cages.....	20

II.	Presses pour procédés continus.....	20
II.1.	Les presses à vis ou à tube perforé	20
II.2.	Les presses à barreaux	21
B.	Les turbines à gaz.....	22
I.	Définition.....	22
II.	Principe de fonctionnement	22
III.	Types de turbines à gaz.....	23
III.1.	Classification selon la circulation de l'agent moteur.....	23
III.2.	Classification selon la source des gaz.....	23
III.3.	Classification selon les caractéristiques de la turbine proprement dite	23
IV.	Cycle thermodynamique	24
IV.1.	Cas de la turbine à combustion externe	24
IV.2.	Cas de la turbine à combustion interne.....	25
V.	Avantages et inconvénients des turbines à gaz	25
VI.	La turbine à gaz à combustion externe (EFGT : Externally Fired Gas Turbine).....	26
VI.1.	Définition.....	26
VI.2.	Les types de turbine à gaz à combustion externe	26
VI.3.	Avantages d'une turbine à gaz à combustion externe	27
VII.	Les microturbines à gaz	28
VII.1.	Définition.....	28
VII.2.	Classement des microturbines	28
VII.3.	Avantages et inconvénients des microturbines.....	28
C.	Les échangeurs de chaleur	29
I.	Introduction	29
II.	Définition d'un échangeur de chaleur.....	30
III.	Classification des échangeurs en fonction de leur configuration.....	30
III.1.	Les échangeurs à tube et à calandre (multitubulaires).....	30
III.2.	Les échangeurs tubulaires coaxiaux	31
III.3.	Les échangeurs à ailettes	31
III.4.	Les échangeurs à plaques.....	32
IV.	Classement des échangeurs en fonction de la circulation des fluides.....	33
IV.1.	Échangeur à co-courant (courant parallèle).....	33

IV.2. Échangeur à contre-courant	33
IV.3. Échangeur à courant croisé	34

Chapitre 4: Les énergies renouvelables

I. Introduction	35
II. Énergie solaire	35
III. Hydroélectricité.....	35
IV. Géothermie.....	36
V. Énergie éolienne.....	36
VI. Biomasse	36
VI.1. Définition.....	36
VI.2. La biomasse-énergie	36
VI.3. Filières de valorisation.....	37
VI.3.1. La voie sèche	37
VI.3.2. La voie humide.....	37
VI.3.3. Les cultures énergétiques (les biocarburants)	38
VI.4. Caractéristiques physico-chimiques de la biomasse.....	38
VI.4.1. Teneur en humidité.....	38
VI.4.2. Teneur en cendres.....	38
VI.4.3. Pouvoir calorifique.....	38
VI.4.4. Masse volumique.....	39
VI.4.5. Granulométrie.....	39
VI.4.6. Composition	39

Partie II:

Conception et Dimensionnement du Mobilab

Chapitre 1: Unité d'extraction mixte par entrainement à la vapeur d'eau et par solvants volatils

Unité d'extraction mixte par entrainement à la vapeur et par solvants volatils	41
I. Unité d'extraction d'huiles essentielles par entrainement à la vapeur d'eau :	41

I.1.	Contribution de la biomasse au recouvrement des besoins de production de vapeur d'eau	42
I.2.	Caractéristiques de la cheminée.....	42
I.3.	Circuit de vapeur dans la cheminée	43
I.4.	Caractéristiques des extracteurs.....	43
I.5.	Dimensionnement de l'aérocondenseur.....	44
I.6.	Dimensionnement du décanteur	45
I.7.	Dimensionnement de la pompe	46
I.8.	Dimensionnement des panneaux solaires	46
II.	Unité d'extraction par solvant volatil (hexane)	47
II.1.	Étapes du procédé d'extraction.....	47
II.2.	Détermination du débit volumique de l'hexane dans les caissons	47
II.3.	Bilan énergétique	48
II.4.	Quantité de biomasse nécessaire par manipulation	50
II.5.	Capacité du caisson mobile	50
II.6.	Temps de vaporisation et temps de séjour de l'hexane dans le ballon	51
II.7.	L'aérocondenseur	51
II.8.	Quantité de biomasse résiduelle de l'unité d'extraction par l'hexane.....	54

Chapitre 2: Unité d'extraction de l'huile d'olive

I.	Introduction	55
II.	Étapes du procédé	55
III.	Dimensionnement de l'unité	56
III.1.	Dimensionnement de la microturbine à gaz à combustion externe	56
III.2.	Dimensionnement de l'échangeur de chaleur.....	60
III.3.	Dimensionnement de la presse	69

Partie III:

Étude Technico-économique et environnement

I.	Introduction	70
II.	Détermination des investissements	70
II.1.	Prix du Mobilab	70

II.1.1.	Prix d'achat du Mobilab.....	70
II.1.2.	Prix de pose du Mobilab	71
II.2.	Prix de la cheminée.....	71
II.3.	Détermination du prix des caissons	72
II.4.	Détermination du prix de l'aérocondenseur	72
II.5.	Détermination du prix du décanteur pour huile essentielle	73
II.6.	Détermination du prix du décanteur Eau- Hexane	73
II.7.	Détermination du prix de l'installation photovoltaïque.....	73
II.8.	Détermination du prix de l'instrumentation et de la tuyauterie.....	73
II.9.	Détermination du prix de la presse	74
II.10.	Détermination du prix de la microturbine	74
II.11.	Détermination du coût de l'échangeur de chaleur :.....	75
II.12.	Détermination du coût total de l'installation	78
III.	Économies d'eau réalisées :.....	79
IV.	Économies réalisées sur la facture énergétique	80
V.	Bilan des émissions de gaz à effet de serre :.....	81
V.1.	Gaz à effet de serre émis par une unité classique	82
V.2.	Gaz à effet de serre émis par le Mobilab	83
VI.	Calcul économique.....	84
VI.1.	Marché des huiles en Algérie	84
VI.1.1.	Marché des huiles essentielles.....	84
IV.1.1.	Marché de l'huile d'olive	84
VI.2.	Estimation du coût opératoire	85
VI.2.1.	Les charges variables	85
VI.2.2.	Les charges fixes	86
VI.2.3.	La main d'œuvre	88
VI.3.	Les recettes annuelles	89
VI.4.	Le délai de retour sur investissement (DRI)	89
	Conclusion	90
	Bibliographie	91
	Annexes	94

Liste des figures

Figure 1: Hydrodistillation à l'échelle industrielle.....	3
Figure 2: Dispositif de la distillation par entraînement à la vapeur d'eau.....	4
Figure 3: Procédé d'extraction à l'hexane.....	11
Figure 4: Procédé d'extraction des huiles végétales par presse.....	16
Figure 5 : Différentes étapes du procédé d'extraction des huiles végétales par presse.....	16
Figure 6: Procédé d'extraction en chaîne continue à trois phases.....	17
Figure 7: Procédé d'extraction en chaîne continue à deux phases.....	18
Figure 8: Presse à tubes perforés.....	21
Figure 9: Presses à barreaux.....	21
Figure 10: Principe de fonctionnement d'une turbine a gaz.....	22
Figure 11: Turbine à gaz à combustion interne.....	24
Figure 12: Turbine à gaz à combustion externe.....	24
Figure 13: Cycle thermodynamique d'une turbine à combustion externe.....	24
Figure 14: Cycle thermodynamique d'une turbine à combustion interne.....	24
Figure 15: L'efficacité électrique de EFGT par rapport aux technologies disponibles pour la production d'électricité à petite échelle à partir de la biomasse solide.....	26
Figure 16: Modes de transfert de chaleur.....	29
Figure 17: Échangeur à tubes et à calandre Calandre à une passe avec chicanes Faisceau de tubes en U à deux passes.....	30
Figure 18: Échangeur à tubes coaxiaux.....	31
Figure 19: Échangeur à ailettes.....	31
Figure 20: Échangeur à plaques www.sites.google.com	32
Figure 21: Évolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur co-courant.....	33
Figure 22: Évolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur contre courant.....	33
Figure 23: Échangeur à courant croisé.....	34
Figure 24: Circuit de vapeur dans la cheminée.....	43
Figure 25: schematisation des extracteurs.....	43
Figure 26: Schéma représentatif du serpentín.....	44
Figure 27: Disposition des ventilateurs de l'aérocondenseur.....	45
Figure 28: Vase florentin.....	45
Figure 29: Cycle thermodynamique de l'air.....	56
Figure 30: Schéma représentatif de l'installation.....	56
Figure 31: Capstone Model C-30 Microturbine.....	59
Figure 32: Modélisation de la composition chimique de la biomasse.....	60
Figure 33: Schéma de l'échangeur de chaleur.....	63
Figure 34: Modèle de presse 6YL-100.....	69
Figure 35: Désignation conventionnelle des échangeurs.....	76

Liste des tableaux

Tableau 1 : Types de solvants utilisés pour l'extraction	10
Tableau 2 : Dates de récolte dans l'hémisphère Nord.....	13
Tableau 3: Limites sur la composition des acides gras de l'huile d'olive.....	15
Tableau 4: Comparaison des différents systèmes d'extraction de l'huile d'olive.....	18
Tableau 5: Avantages et inconvénients des microturbines.....	28
Tableau 6: Caractéristiques du Container moyen.....	40
Tableau 7: Débits de matière du Mobilab moyen.....	42
Tableau 8 : Contribution de la biomasse au recouvrement des besoins de production de vapeur d'eau	42
Tableau 9: Caractéristiques de la cheminée	42
Tableau 10: Dimensions du caisson mobile	44
Tableau 11: Nombre des caissons mobiles.....	44
Tableau 12: Dimensionnement du serpentin et de l'aérocondenseur	44
Tableau 13: Dimensions du décanteur	45
Tableau 14: Dimensions de la pompe.....	46
Tableau 15: Quantification de la consommation électrique.....	46
Tableau 16: Caractéristiques des panneaux solaires.....	46
Tableau 17: Recouvrement du besoin énergétique de la vaporisation des débits massiques d'hexane par la biomasse	49
Tableau 18: Masse volumique de certaines plantes	50
Tableau 19: Comparaison de la surface des serpentins.....	53
Tableau 20: Quantité de biomasse non valorisée.....	54
Tableau 21: Caractéristiques de quelques moteurs thermiques.....	55
Tableau 22 : Caractéristiques techniques de la microturbine (20 kW).....	59
Tableau 23: Dimensions du Capstone Model C-30 Microturbines.....	59
Tableau 24: Températures T_5 et T_6 en régime transitoire pour différents ζ	62
Tableau 25: Valeurs du coefficient de convection pour différents ζ	64
Tableau 26: Coefficient de convection de l'air dans la calandre (approche 1).....	65
Tableau 27: Nombre de tubes dans l'échangeur en fonction de ζ (approche 1).....	66
Tableau 28: Récapitulatif de (approche 1).....	66
Tableau 29: Coefficient de convection de l'air dans la calandre (approche 2).....	67
Tableau 30: Nombre de tubes dans l'échangeur en fonction de ζ approche 2.....	67
Tableau 31: Récapitulatif de l'approche 2.....	67
Tableau 32: Caractéristiques de l'échangeur de chaleur	68
Tableau 33: Caractéristiques techniques de la presse 6YL-100	69
Tableau 34: Estimation du coût du Mobilab	70
Tableau 35: Estimation du coût de pose du Mobilab	71
Tableau 36: Estimation du coût de la cheminée	71
Tableau 37: Estimation du coût des caissons	72
Tableau 38: Estimation du coût de l'aérocondenseur	72

<i>Tableau 39: Estimation du coût des décanteurs</i>	<i>73</i>
<i>Tableau 40: Estimation du coût de l'installation photovoltaïque</i>	<i>73</i>
<i>Tableau 41: Estimation du coût de la presse</i>	<i>74</i>
<i>Tableau 42: Estimation du coût de la microturbine</i>	<i>74</i>
<i>Tableau 43: Prix des échangeurs tubulaires</i>	<i>75</i>
<i>Tableau 44 : Influence du type (valeurs globales).....</i>	<i>76</i>
<i>Tableau 45: Influence de la longueur du faisceau.....</i>	<i>77</i>
<i>Tableau 46: Influence du nombre de passes coté tubes.....</i>	<i>77</i>
<i>Tableau 47: Influence de la pression maximale</i>	<i>77</i>
<i>Tableau 48:Influence de la nature du matériau</i>	<i>77</i>
<i>Tableau 49: Influence de la température.....</i>	<i>78</i>
<i>Tableau 50: Estimation du coût total de l'installation</i>	<i>78</i>
<i>Tableau 51: Temps de fonctionnement maximum de chaque unité</i>	<i>79</i>
<i>Tableau 52: Répartition du temps de fonctionnement de chaque unité dans le Mobilab.....</i>	<i>79</i>
<i>Tableau 53: Économies d'eau réalisées par an.....</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 54: Facture énergétique du Mobilab</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 55: Économies réalisées sur la facture énergétique.....</i>	<i>80</i>
<i>Tableau 56:Émissions de CO₂ et de NO_x par source énergétique.....</i>	<i>81</i>
<i>Tableau 57: Apport énergétique total annuel de la biomasse et du solaire</i>	<i>82</i>
<i>Tableau 58: Comparatif des émissions de gaz à effet de serre.....</i>	<i>83</i>
<i>Tableau 59: Matière végétale traitée pour chaque unité.....</i>	<i>85</i>
<i>Tableau 60:Durée d'amortissement types de diverses installations.....</i>	<i>86</i>
<i>Tableau 61: Financement de l'investissement</i>	<i>87</i>
<i>Tableau 62: Calcul des intérêts d'investissement sur Excel.....</i>	<i>87</i>
<i>Tableau 63:Calcul VPM sur Excel</i>	<i>88</i>
<i>Tableau 64: Salaires par catégorie professionnelle</i>	<i>88</i>
<i>Tableau 65:Résumé du coût opératoire.....</i>	<i>88</i>

Introduction

Générale

Introduction générale

Les nouvelles technologies de l'énergie présentent un enjeu industriel majeur, dans le contexte du renchérissement et de la raréfaction des sources d'énergie fossiles, conjugué à la perspective de pénalisation croissante des émissions de CO₂. Les énergies renouvelables apparaissent comme la réponse à la disparition programmée des énergies fossiles car elles sont quasiment illimitées, peu polluantes et elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux.

Une industrie ne peut plus se contenter d'objectifs strictement économiques ; en effet le principal enjeu pour une industrie, inscrite dans une démarche de développement durable, est de concilier croissance et efficacité économique tout en satisfaisant les besoins humains et en préservant l'environnement

Dans le secteur des industries agroalimentaires, chaque étape du procédé nécessite un apport en énergie. Une alimentation en énergie adaptée, rentable et durable sur un plan environnemental s'impose donc pour soutenir le développement d'agro-industries compétitives.

C'est dans ce contexte que nous nous sommes intéressées à la production des huiles essentielles et végétales.

Les huiles essentielles du fait qu'elles génèrent une forte valeur ajoutée, et les huiles végétales (plus précisément l'huile d'olive), du fait que ce soit un secteur en pleine expansion en Algérie. En effet, l'essor de l'oléiculture est remarquable grâce aux bénéfices que procure l'olivier et ne cesse de croître à l'aide de l'administration qui encourage les agriculteurs.

Partant d'une unité mobile d'extraction des huiles essentielles, intégrant les énergies renouvelables, produisant de l'énergie thermique à partir de la biomasse et électrique moyennant le solaire photovoltaïque; nous nous sommes proposées d'apporter des améliorations en ajoutant un module d'extraction par solvant volatil. Puis nous nous sommes penchées sur la question relative à la production d'énergie mécanique grâce à la biomasse.

Notre unité devra tenir compte des contraintes techniques, économiques et environnementales, et aura comme objectifs:

- D'être mobile, afin de permettre une adaptation au site et éviter le transport et le stockage du substrat végétal, et ses dégradations possibles lors de ces manipulations.
- D'intégrer les énergies renouvelables dans le procédé d'extraction des huiles essentielles et végétales.
 - D'être énergétiquement autonome.
 - D'économiser l'eau, une ressource précieuse.
 - D'être moins polluante, en réduisant les rejets solides, liquides et les émissions de gaz à effet de serre.
- D'être économiquement viable.

Partie I:

Généralités

Nomenclature Partie 1

Nom	Signification	Unité
Q_{23}	Chaleur de l'échauffement	[Joule]
T_1	Température entrée du compresseur	[K]
T_2	Température sortie du compresseur	[K]
T_3	Température entrée turbine	[K]
T_4	Température sortie turbine	[K]
ρ	Masse volumique	[kg/m ³]

Chapitre 1: Les huiles essentielles et végétales

A. Les huiles essentielles

I. Définition d'une huile essentielle

Une huile essentielle est une essence végétale, autrement dit, un liquide concentré et hydrophobe des composés aromatiques volatils d'une plante.

Contrairement à ce que leur nom laisse entendre, ces extraits ne sont pas forcément huileux, en effet le terme huile fait référence au fait que ces huiles sont solubles dans la graisse et non pas qu'elles soient des extraits contenant des corps gras.

D'un point de vue chimique, une huile essentielle est un mélange de molécules variées comprenant en particulier terpènes (hydrocarbures non aromatiques) et des composés oxygénés tels que les alcools les aldéhydes et les cétones [1].

Selon la norme (AFNOR NF - T75.006 - 10/87), une huile essentielle est obtenue par la distillation d'une plante botaniquement définie dans un alambic au moyen de vapeur d'eau sous basse pression.

Le produit obtenu par expression mécanique sur les agrumes devrait être appelé essence et non huile essentielle [2].

II. Utilisations des huiles essentielles

Les huiles essentielles sont désodorisantes, parfumantes, antiseptiques, protectrices, respiratoires. Leur utilisation réduit les attaques virales et microbiennes, réduit l'oxydation des cellules et augmente la vitalité de l'organisme dans ces flux vitaux.

Elles apportent à notre organisme, les concentrés de la nature les plus précieux pour rétablir ou conserver l'équilibre indispensable à notre santé. Elles ont beaucoup de bienfaits, que ce soit pour notre santé ou pour notre hygiène [3].

III. Propriété d'une huile essentielle

Les huiles essentielles sont caractérisées par différentes propriétés, à savoir :

III.1. Propriétés organoleptiques

- Leur couleur, elle vieillit et s'oxyde, il convient de les conserver à l'abri de la lumière et de l'air.
- Leur odeur, elle diffère d'une plante à une autre.
- Leur aspect est généralement liquide et limpide à température ambiante [47].

III.2. Propriétés chimiques

- Elles sont facilement oxydables en présence de la lumière. Elles se résinifient en absorbant l'oxygène en même temps que leur odeur se modifie et leur point d'ébullition augmente.
- Elles ont la capacité d'absorber certains éléments chimiques essentiellement les halogènes tels que le chlore, le brome et l'iode avec dégagement de chaleur [47].

III.3. Propriétés physiques

- Leur densité varie généralement entre 0,850 et 0,965. Cependant certaines huiles essentielles sont plus denses que l'eau, c'est le cas de l'huile essentielle de wintergreen avec une densité de 1,187.

- Ayant des composés asymétriques, elles polarisent la lumière, les huiles essentielles sont dotées d'un pouvoir rotatoire.

- Leur indice de réfraction est souvent très élevé.

- Elles sont volatiles et entraînaient par la vapeur d'eau.

- Hydrophobes et peu solubles dans l'eau.

- Elles sont solubles dans les huiles végétales et dans l'alcool jusqu'à un certain pourcentage [47].

IV. Procédés d'extraction des huiles essentielles

IV.1. Extraction par hydrodistillation

L'hydrodistillation consiste à porter à ébullition, un mélange de composé organique et d'eau. La vapeur d'eau formée entraîne les composés organiques à l'état gazeux vers le réfrigérant. La condensation de ce mélange gazeux, provoque sa séparation en deux phases liquides:

- Une phase organique huileuse et très odorante, appelée "huile essentielle", contenant la majorité des composés odorants.

- Une phase aqueuse, odorante, appelée "eaux aromatiques", qui n'en contient que très peu [4].

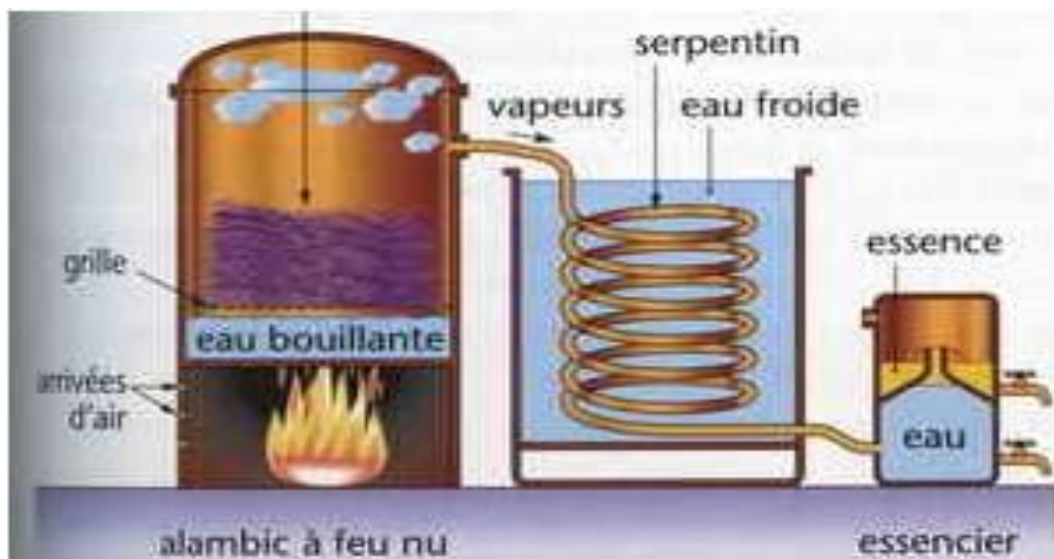


Figure 1: Hydrodistillation à l'échelle industrielle [5]

IV.2.Extraction par entraînement à la vapeur d'eau

Le procédé, relativement récent, appelé «distillation par entraînement à la vapeur d'eau» apporte une amélioration certaine de la qualité des produits obtenus en minimisant les altérations hydrolytiques (particulièrement des esters) liées au procédé traditionnel de distillation; l'installation comporte une chaudière à vapeur séparée de l'alambic.

À la sortie du réfrigérant (à circulation d'eau froide) dans lequel se sont condensées les vapeurs, l'eau distillée et l'huile essentielle (plus légère que l'eau) se séparent [6].

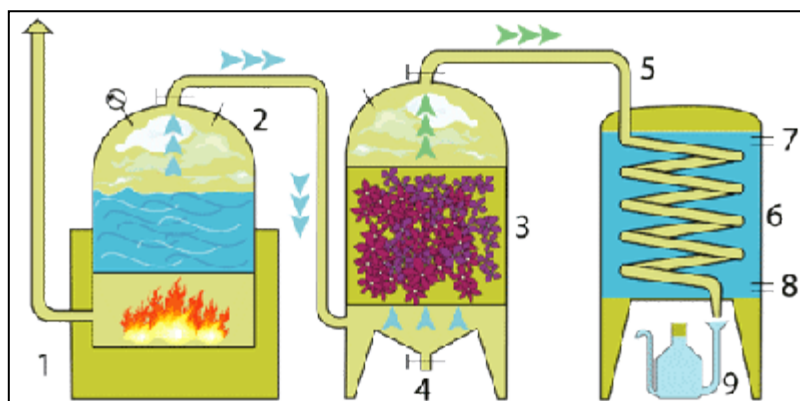


Figure 2: Dispositif de la distillation par entraînement à la vapeur d'eau[7]

- | | |
|------------------------------|--|
| 1. Foyer ; | 6. Condenseur ; |
| 2. Chaudière ; | 7. Sortie d'eau chaude ; |
| 3. Alambic ; | 8. Arrivée d'eau froide ; |
| 4. Vidange de condensation ; | 9. Essencier (vase florentin) où sont |
| 5. Col de cygne ; | décantés hydrolat et huile essentielle |

Dans un alambic muni d'un tamis, on place les plantes à distiller dans un panier qui servira au relevage. La cuve étant hermétiquement fermée, on fait traverser les plantes par de la vapeur d'eau. Celle-ci entraîne les arômes des plantes à travers le col de cygne, puis vers un tube en forme de serpentin qui baigne dans une cuve remplie d'eau froide. La vapeur se refroidit au passage, et se condense. Cette vapeur condensée, se sépare en deux éléments par différence de densité : l'huile essentielle et l'eau florale. La plupart des huiles essentielles sont plus légères que l'eau et elles sont récupérées dans la partie supérieure du séparateur, appelé aussi essencier ou vase florentin [47].

IV.3. Hydrodiffusion

Contrairement à l'extraction par entraînement à la vapeur d'eau, l'Hydrodiffusion fait passer la vapeur de haut en bas à travers la matière végétale, diminuant ainsi le temps de distillation de 30% et augmentant le rendement de l'extraction.

Cependant la composition des produits obtenus est légèrement différente de celle des produits obtenus par entraînement à la vapeur d'eau [47].

IV.4. Extraction par expression

Ce procédé s'applique aux huiles citronnées et agrumes (bergamote, citron, mandarine, orange...). Dans ce cas, les écorces ou zestes, sont tout simplement pressés par une machine (quelquefois à la main) pour en recueillir les essences. Le produit obtenu se nomme «essence» et non «huile essentielle» car aucune modification chimique liée à la vapeur d'eau n'a eu lieu [8].

V. Stockage et conservation des huiles essentielles

Les huiles essentielles sont fragiles et volatiles. Elles doivent être conservées dans des flacons teintés soigneusement bouchés, à l'abri de l'air, de la lumière et des variations de température. Les huiles essentielles se conservent entre 2 et 5 ans, à une température comprise entre 10 et 25°C.

Les huiles essentielles interagissent avec les matières plastiques, pour cette raison elles doivent être stockées dans des flacons en verre ou en aluminium maintenus en position verticale pour éviter le contact avec le bouchon [47].

Rendement: Quelques chiffres

Pour obtenir 1 kg d'huile essentielle, il faut :

- 7kg de boutons floraux de clou de girofle.
- 50 kg de lavandin.
- 150 kg de lavande vraie.
- 1 tonne d'immortelle.
- 4 tonnes de pétales de Rose de Damas.
- 5 à 10 tonnes de mélisse citronnelle vraie [9].

B. Les huiles végétales

I. Définition des huiles végétales

Les huiles végétales sont le plus souvent extraites des graines oléagineuses (arachide, tournesol, colza, soja), leur extraction à partir de la pulpe des fruits est limitée à deux principales espèces : Olive et palme.

Les oléagineux sont des plantes cultivées spécifiquement pour leurs graines ou leurs fruits riches en matières grasses, dont on extrait de l'huile à usage alimentaire, énergétique ou industriel. Les résidus de l'extraction constituent les tourteaux généralement recyclés dans l'alimentation animale [10].

II. Composition des huiles végétales

Les huiles végétales se composent essentiellement de :

II.1. Triglycérides

Un triglycéride est composé de 3 acides gras fixés sur une molécule de glycérol :

- **Les acides gras saturés** : Un Acide gras est saturé quand il ne possède pas de double liaison.
- **Les acides gras mono-insaturés** : Un acide gras est mono-insaturé quand il contient une double liaison.
Le plus fréquent est l'acide oléique (C18 : 1). Il se trouve dans tous les corps gras.
- **Les acides gras polyinsaturés essentiels** : Quand un acide gras contient plusieurs doubles liaisons, il s'agit alors d'un « acide gras polyinsaturé » [11].

Le niveau d'insaturation d'une huile est fonction du nombre de doubles liaisons. Il est mesuré par l'indice d'iode (0 à 210 suivant les huiles) [11].

II.2. Insaponifiable

Fraction qui ne peut pas être transformée en savon.

Il est composé suivant les huiles :

- De vitamines (A, D, E sous forme de tocophérols) ;
- De différents stérols (l'analyse de ces composants donne une carte génétique de l'huile et permet son identification) ;
- De cires ;
- D'hydrocarbures naturels (carotène, squalène,...) [11].

II.3. Acides gras libres

Les acides gras libres ne sont pas fixés à une molécule de glycérol et sont peu assimilables par l'homme. Le raffinage permet notamment de les retirer. La teneur d'une huile en acide gras libre s'exprime par l'acidité oléique [11].

III. Propriétés des huiles végétales

Les huiles végétales connaissent différentes propriétés :

III.1. Propriétés organoleptiques

- Leur odeur, elle diffère d'une plante à une autre, les huiles végétales raffinées subissent une opération de désodorisation cette étape permet de débarrasser l'huile de son odeur.
- Leur aspect est généralement liquide à température ambiante, on hydrogène certaines huiles lorsqu'on a besoin de produits solides car les glycérides constituant l'huile sont d'autant plus solides qu'ils sont plus saturés et que leur poids moléculaire est plus élevé.
- Leur couleur diffère d'une plante à une autre, les huiles végétales raffinées subissent une opération de décoloration qui sert à éliminer les pigments contenus dans l'huile [36].

III.2. Propriétés physiques

- La densité des huiles végétales varie de 0.915 à 0.964.
- Le point de fusion et le point de solidification permettent d'apprécier le degré de pureté d'une huile végétale.
- Le point de fumage c'est la température au-dessus de laquelle il ne faut pas chauffer l'huile. Quand l'huile atteint cette température, ses composants se dégradent, forment des composés toxiques et l'huile fume.
- La viscosité pour une température donnée.
- L'indice de réfraction croît avec l'insaturation et la longueur moyenne des chaînes d'acides gras.
- Les huiles végétales sont hydrophobes et insolubles dans l'eau de manière générale.
- Ce sont des bases pour la dilution des huiles essentielles [36].

III.3. Propriétés chimiques

- Indice d'acide : c'est le nombre de mg de potasse nécessaire pour neutraliser l'acidité de 1g de corps gras.
- Indice de saponification : c'est le nombre de mg de potasse caustique (KOH) nécessaire pour transformer en savon les acides gras libres ou combinés d'un gramme de corps gras.
- Indice d'Iode : c'est le nombre de grammes d'Iode fixé par 100g de corps gras, il caractérise l'insaturation du corps gras.
- Indice de peroxyde : il donne la quantité d'oxygène actif capable de libérer l'Iode des iodures [11].

III.4. Propriétés biochimiques

Les huiles végétales sont composées en majorité d'acides gras insaturés principalement : l'acide oléique, l'acide linoléique (Oméga 6) et l'acide alpha linoléique (Oméga 3), à chaque huile sa propre composition, c'est la nature des acides gras qui différencient les huiles végétales.

Les Oméga 3 et les Oméga 6 des huiles végétales sont aussi appelés les "acides gras essentiels" car notre corps ne sait pas les fabriquer. Il doit impérativement les trouver dans l'alimentation.

- L'Oméga 6 est particulièrement utile pour la santé et la beauté de la peau et participe à la diminution du mauvais cholestérol dans le sang. L'huile de tournesol est une précieuse source d'Oméga 6.
- L'acide oléique aide à réguler le cholestérol sanguin et participe à équilibrer les lipides alimentaires. Les huiles d'olive et de colza sont riches en acide oléique.
- L'Oméga 3 participe au développement du cerveau et du système nerveux, ainsi qu'au bon fonctionnement du système cardio-vasculaire.

Les huiles végétales sont aussi la principale source de vitamine E, puissant antioxydant, qui aurait un rôle protecteur vis-à-vis de l'athérosclérose et du vieillissement. L'huile de tournesol est la plus riche en vitamine E [12].

IV. Utilisation des huiles végétales

Les huiles végétales sont utilisées dans plusieurs domaines dont on cite quelques-uns:

IV.1. Alimentation

Les huiles végétales jouent un rôle majeur sur le bon fonctionnement de l'organisme dès le plus jeune âge et tout au long de la vie, elles participent notamment à la prévention des maladies cardio-vasculaires. Par exemple, l'huile de palme est appréciée pour la friture et la fabrication de margarines et l'huile de tournesol est une huile plutôt légère, excellente pour la friture et la vinaigrette [13].

IV.2. Pharmacie et cosmétique

Les huiles végétales rentrent dans la composition de sirop, de pommades, etc. Elles ont une action anti déshydratante, elles restaurent le film hydrolipidique de la peau qui constitue une barrière défensive naturelle, nourrissent la peau et forment une couche grasse qui empêche l'eau de s'évaporer :

- L'huile d'amande douce est anti-gerçures, anti-inflammatoire, anti-vergetures, apaisante, assouplissante, émollissante, hydratante, nourrissante, restructurante, tonifiante.
- L'huile de noyau d'abricot est nourrissante et émollissante, mais également revitalisante, tonifiante et adoucissante. Elle retarde le vieillissement de la peau [13].

IV.3. Industrie chimique

- Les solvants dérivés d'huiles végétales appelés « agro-solvants » sont une alternative aux solvants pétrochimiques dans de nombreuses applications industrielles (nettoyage de pièces mécaniques, débituminants, etc...).
- Les revêtements, c'est-à-dire les peintures, les encres, des vernis, les lasures...
- Les lubrifiants hors moteurs, les huiles sont utilisées dans l'industrie pour le traitement des métaux, ou comme fluide hydraulique.
- Usage de l'huile végétale en tant que Biocarburant [13].

V. Procédé de fabrication des huiles végétales

La fabrication des huiles végétales passe par deux étapes essentielles, à savoir la trituration des graines et le raffinage de l'huile brute obtenue :

V.1. Trituration des graines

La trituration est une opération de broyage par friction, combinant un mouvement de frottement et une forte pression. Avant de procéder à cette opération, les graines doivent être préparées. En effet, la préparation des graines joue un rôle très important dans la qualité d'huile, cette étape est destinée à faciliter l'extraction de l'huile des graines et passe par les opérations suivantes [37]:

- **Nettoyage** : il permet d'éliminer les particules métalliques, de terre, de pierre dont la présence risque d'endommager le circuit de trituration.

Les divers appareils utilisés sont les tamis vibrants, les tamis à ondes sonores, les tables densimétriques, les cyclones avec précipitation de poussière.

- **Décortiquage et dépelliculage** : certaines graines nécessitent cette opération, étant donné qu'il y a une différence entre les graines en termes d'épaisseur, de dureté et d'adhérence de l'enveloppe; des appareils spéciaux sont nécessaires pour chaque catégorie de graines à décortiquer.

- **Broyage et tamisage** : cette opération a pour but de réduire la dimension des fruits ou des graines oléagineuses afin de faciliter le travail des presses ou l'action du solvant.

- **Conditionnement thermique de la graine** : avant de la soumettre au pressage, la graine broyée est chauffée, le chauffage a pour avantage de faciliter la sortie des corps gras en augmentant la perméabilité des parois des cellules qui les renferment. Le matériel utilisé pour cette opération est : chauffeoir vertical et chauffeoir tubulaire horizontal.

Après la préparation des graines, on procède à leur trituration. L'huile obtenue est appelée l'huile brute et désigne l'huile non raffinée, elle peut être obtenue suivant deux procédés :

- Mécanique : par application d'une pression.
- Diffusionnel : par extraction au solvant.

V.1.1. Extraction par pression

Il existe deux types de procédés d'extraction par pression :

- **Le procédé discontinu** utilise des presses hydrauliques : un vérin puissant écrase les graines disposées dans une chambre de compression munie d'orifices permettant l'écoulement de l'huile. Ces presses fournissent des pressions de l'ordre de 400 à 500 bars. Les presses hydrauliques ne sont plus utilisées que dans certains cas particuliers et pour des productions artisanales. Ce procédé possède un faible rendement et donne des tourteaux encore très gras dont le taux résiduel de matières grasses est de l'ordre de 6 à 12% [36].

- **Le procédé continu** utilise les presses à vis sans fin qui ont l'avantage de fonctionner en continu: les graines sont entraînées par la vis dans un volume de plus en plus restreint, de ce fait la pression que subit la matière augmente. Les procédés continus sont actuellement les plus utilisés en huilerie industrielle [36].

V.1.2. Extraction par solvant

L'extraction par solvant des huiles est essentiellement réalisée industriellement en mettant en contact la matière oléagineuse à traiter avec le solvant approprié, on obtient ainsi un mélange d'huile et de solvant appelé « miscella » dont la concentration varie suivant la qualité du solvant et la richesse en huile [36].

Tableau 1 : Types de solvants utilisés pour l'extraction [36]

Type de solvant	Solvant le plus utilisé	Avantages	Inconvénients
Les dérivés du pétrole	Hexane	-Étant apolaire, il a une grande affinité pour les lipides. -Il ne demande pas beaucoup d'énergie pour être distillé et il n'est pas miscible dans l'eau.	-Inflammable et donne, avec l'air, des mélanges explosifs.
Les solvants chlorés	Le Trichloréthylène	-Ininflammables. -L'efficacité de ce solvant s'est révélée supérieure à celle de l'hexane pour des températures de l'ordre de 55 °C.	-Son point d'ébullition est plus élevé que celui de l'hexane, ce qui oblige à chauffer davantage au cours de la distillation des miscellas. -Les pertes au raffinage de l'huile sont élevées. -Les vapeurs présentent des dangers de corrosion.
Les alcools	L'alcool éthylique	-Son efficacité est toujours réelle à basse température. -Produit extrêmement sain.	-Contraintes administratives et fiscales.

Les deux techniques d'extraction (presse, par solvant) peuvent être utilisées successivement pour les graines riches en matières grasses (tournesol, colza, lin). Pour les graines à plus faible teneur en huile (le soja), la technique d'extraction par solvant est la plus efficace.

Le schéma suivant donne les étapes du procédé d'extraction des huiles à l'hexane :

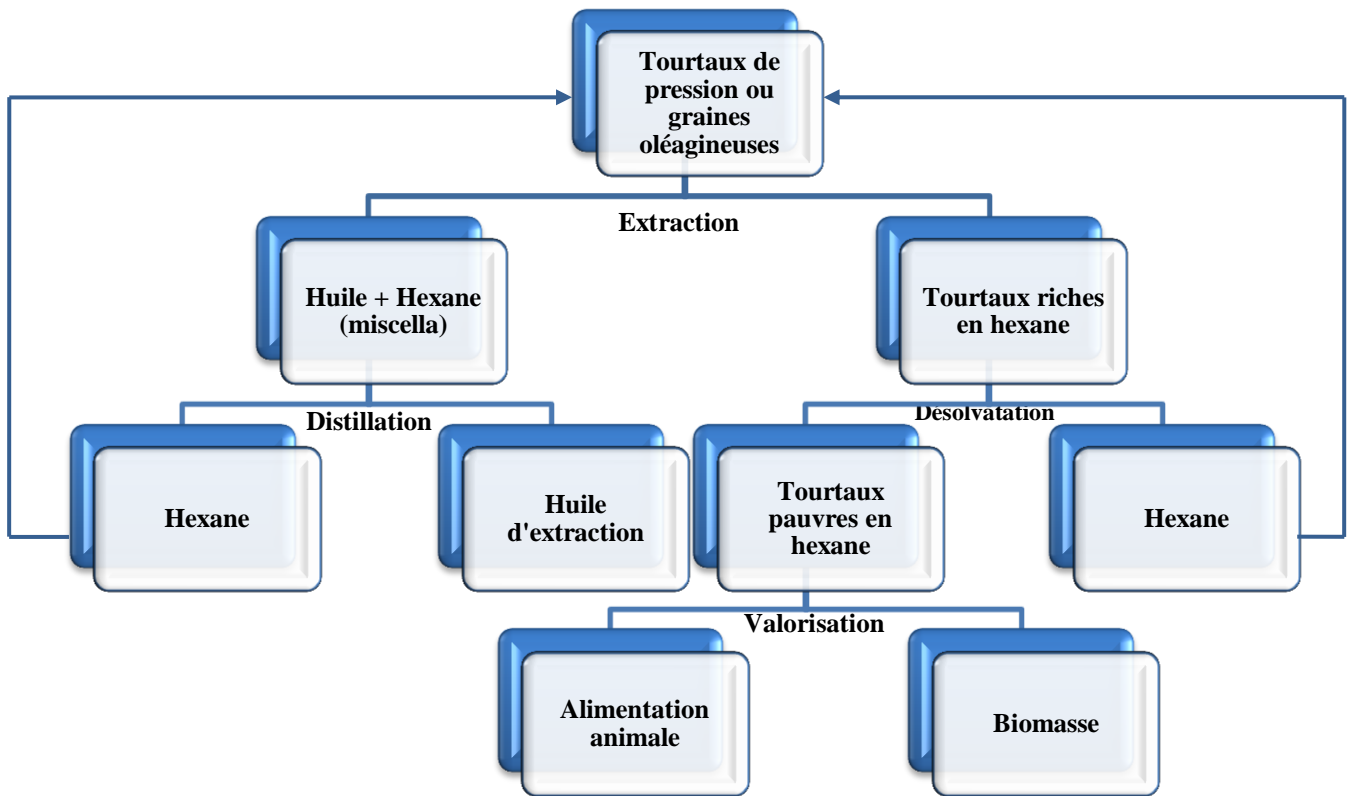


Figure 3: Procédé d'extraction à l'hexane

V.2. Raffinage de l'huile

Le raffinage est l'ensemble des opérations qui servent à transformer l'huile brute en un produit comestible en éliminant les impuretés qui le rendent impropres à la consommation en l'état.

En effet, les huiles contiennent de nombreux composés : certains sont très utiles (vitamines, insaponifiables, etc.), d'autres sont nuisibles à leur qualité (gommes, acides gras libres, pigments, agents odorants, etc.) [36].

Le raffinage consiste donc à éliminer au mieux ces composés afin d'obtenir une huile aux qualités organoleptiques et chimiques satisfaisantes. Il comprend plusieurs opérations [36]:

- **Démucilagination (ou dégomme)** : elle permet de débarrasser les huiles des gommes après leur hydrolyse par un acide.
- **Neutralisation** : les acides gras libres sont les impuretés les plus représentées dans les huiles à raffiner. L'étape de neutralisation sert à éliminer ces composés susceptibles d'accélérer l'oxydation de l'huile. Elle se fait à l'aide de soude caustique et est suivie d'un lavage à l'eau et d'un séchage.
- **Décoloration** : elle sert à éliminer les pigments contenus dans l'huile.
- **Filtration** : cette étape permet d'obtenir une huile limpide après élimination de la terre décolorante.
- **Désodorisation** : cette étape permet de débarrasser l'huile de son odeur désagréable par distillation sous vide.

VI. Conservation et stockage des huiles végétales

Les huiles doivent être protégées de l'air et de la lumière (à cause de l'oxydation), ainsi que de la chaleur. L'oxydation a lieu plus vite sous l'effet des rayons ultraviolets, de la chaleur ou en présence d'ions métalliques comme le Fe^{2+} ou Cu^{2+} . Elle modifie le goût et des composés indésirables (acides gras libres et peroxydes) apparaissent, qui peuvent être dangereux pour la santé.

Les huiles pressées à froid contiennent naturellement plus de substances antioxydantes que les huiles raffinées, lorsque les antioxydants contenus dans l'huile sont épuisés, elle commence à rancir : elle prend un goût âcre et une odeur désagréable ; elle n'est alors plus consommable [10].

Les huiles vierges pré-emballées peuvent se conserver jusqu'à un an dans leur bouteille d'origine, à l'abri de la lumière de préférence; après ouverture, il faut les mettre [10]:

- À l'abri de la lumière (à température ambiante ou au réfrigérateur) : pour les huiles d'arachide, de carthame oléique, d'olive, de pépins de courge, de tournesol oléique ou de sésame ;
- Au réfrigérateur et pas plus de 6 mois pour les plus riches en acides gras polyinsaturés ;
- Au réfrigérateur entre 1 et 3 mois pour les plus riches en acides alpha-linoléniques.

Chapitre 2:

L'huile d'olive

I. L'olivier

L'olivier (*Olea europea*) est un arbre robuste qui vit plusieurs siècles, de taille moyenne, qui varie entre 4 et 10 m de haut, il nécessite peu d'eau et vit dans un sol sec. L'olivier produit des fruits une année sur deux, en alternance avec la croissance de son bois. Il supporte le froid mais pas le gel prolongé qui peut détruire ses bourgeons en très peu de temps et donc réduire considérablement la production. S'il est correctement cultivé, il peut commencer à produire à partir de la cinquième année. Cependant la pleine production n'est atteinte qu'après quelques dizaines d'années.

Un olivier peut produire en moyenne de 15 à 50 kilos d'olives. L'obtention d'un litre d'huile nécessite 4 à 6 kilos d'olives suivant la variété et la méthode de presse employées [38].

Tableau 2 : Dates de récolte dans l'hémisphère Nord[14]

Avril	Juin	Septembre	Décembre
Selon les pays et la météo, les fleurs blanches éclosent.	L'olive change de couleur, d'abord verte, puis violette et finalement noire, lentement, le fruit se gonfle d'huile.	On cueille les olives vertes.	On cueille les olives noires.

La récolte se fait encore souvent de manière traditionnelle en gaulant les olives avec un filet placé sous l'arbre ou bien à l'aide d'un panier et d'une échelle. Les techniques modernes utilisent des aspirateurs ou des machines qui secouent les arbres [14].

II. Définition et classification de l'huile d'olive

L'huile d'olive est l'huile végétale provenant uniquement du fruit de l'olivier à l'exclusion des huiles obtenues par solvant ou par des procédés de réestérification et de tout mélange avec des huiles d'autre nature. Conformément à la norme COI/T.15/NC num. 2 REV. Du 20 novembre 1997 émise par le Conseil Oléicole International, voici le classement des huiles d'olive :

II.1. L'huile d'olive vierge

C'est l'huile obtenue de fruit de l'olivier uniquement par des procédés mécaniques ou d'autres procédés physiques dans des conditions, thermiques notamment, qui n'entraînent pas d'altération de l'huile, et n'ayant subi aucun traitement autre que le lavage, la décantation, la centrifugation et la filtration [15].

On distingue deux types d'huiles d'olive vierges :

II.1.1. L'huile d'olive vierge propre à la consommation

- Huile d'olive extra vierge dont l'acidité est inférieure à 1%.
- Huile d'olive vierge dont l'acidité est inférieure à 2%.
- Huile d'olive courante dont l'acidité est inférieure à 3,3% [15].

II.1.2. L'huile d'olive vierge non propre à la consommation

Appelée aussi l'huile d'olive vierge lampante, c'est l'huile d'olive vierge dont l'acidité libre exprimée en acide oléique est supérieure à 3,3 grammes pour 100 grammes et / ou dont les caractéristiques organoleptiques correspondent à celles fixées pour cette catégorie par la présente norme. Elle est destinée aux industries du raffinage ou à des usages techniques. On distingue, l'huile d'olive raffinée et l'huile d'olive simple :

- L'huile d'olive raffinée est l'huile d'olive obtenue des huiles d'olives vierges par les techniques de raffinage qui n'entraînent pas de modification de la structure glycérique initiale.
- L'huile d'olive simple est l'huile constituée par le coupage d'huile d'olive raffinée et d'huile d'olive vierge propre à la consommation en l'état [15].

II.2. L'huile de grignons d'olive

C'est l'huile obtenue par traitement aux solvants des grignons d'olive à l'exclusion des huiles obtenues par des procédés de réestérification et de tout mélange avec d'autres huiles. Elle est commercialisée selon les dénominations et définition ci –après :

- **L'huile de grignons d'olive brute** est l'huile de grignons d'olive destinée au raffinage en vue de son utilisation dans l'alimentation humaine ou destinée à des usages techniques.
- **L'huile de grignons d'olive raffinée** est l'huile obtenue à partir de l'huile de grignons d'olive brute par des techniques de raffinage n'entraînant pas de modifications de la structure glycérique initiale.
- **L'huile de grignons d'olive** est l'huile constituée par le coupage d'huile de grignons d'olive raffinée et d'huile d'olive vierge propre à la consommation en l'état ; un coupage ne peut, en aucun cas, être dénommé [15].

III. Composition Chimique de l'huile d'olive

L'huile d'olive a une basse teneur en acides gras saturés et une teneur élevée en acides gras mono non-saturés. En moyenne, on estime qu'elle est composée de 14% d'acides gras saturés, 11% de poly non-saturés et 60-80% d'acide oléique. D'ailleurs elle contient des polyphénols, de la vitamine E, des flavonoïdes, de la provitamine A, des minéraux et des microéléments¹. Certains de ces ingrédients fonctionnent comme antioxydants non seulement pour le corps humain mais pour le « corps » de l'huile d'olive aussi bien. Les antioxydants protègent le corps humain contre les dommages qui proviennent de l'oxydation par les radicaux libres, tandis qu'ils protègent en même temps l'huile d'olive contre l'oxydation (rancidité).

L'huile d'olive, comme toutes les huiles végétales, est constituée par une fraction liposoluble (les triglycérides) puis une fraction non liposoluble (composants secondaires) [16].

¹ Élément chimique nutritive dont les végétaux ont besoin de petites quantités pour croître et bien se développer. Il n'y a donc aucun rapport avec leur taille. Ce sont des oligo-éléments dont la concentration est inférieure à 1% dans la matière sèche [27].

La fraction liposoluble correspond à 99% de l'huile d'olive. Les acides gras qui composent les triglycérides de l'huile d'olive varient, et ils dépendent en partie de la région de provenance de l'huile d'olive. Les limites, qui ont été posées par le Conseil Oléicole International (COI) sur la composition des acides gras, sont les suivantes [17]:

Tableau 3: Limites sur la composition des acides gras de l'huile d'olive [17]

Types d'Acides Gras	Limites
Acide palmitique	7.5 – 20 %
Acide palmitoléique	0.3 – 3.5 %
Acide stéarique	0.5 – 5.0 %
Acide oléique	55 – 83 %
Acide linoléique	3.5 – 21 %
Acide α -linoléique	0.0 – 1.5 %

IV. Procédés d'extraction de l'huile d'olive

Une fois cueillies, les olives sont triées afin d'éliminer les brindilles et feuilles puis lavées à l'eau froide. Les olives et leurs noyaux, contenant un antioxydant faisant office de conservateur naturel, sont ensuite broyées. Le broyage en industrie se fait à l'aide d'un broyeur métallique (à marteaux, à disques dentés ou à cylindres striés) et aboutit à la formation d'une pâte. Pour faciliter l'extraction de l'huile, ce type de broyage doit être complété par un malaxage, étape permettant de réunir en une phase continue les gouttes d'huiles dispersées dans la pâte [18].

Le système d'extraction de l'huile d'olive se subdivise en trois types selon la machinerie utilisée :

IV.1. Les unités de trituration qui sont équipées de presses

Ce système utilise des presses métalliques à vis, ou le cas échéant des presses hydrauliques. La pâte issue du broyage est empilée sur les scourtins, disques en fibre naturelle ou synthétique, faisant office d'armature et permettant la filtration lors de la pression à raison de 5 à 10 kg/scourtin.

L'application de la pression sur la charge des scourtins doit être réalisée de manière progressive et la durée totale de l'opération de pressage réalisée en une seule fois varie entre 45 et 60 mn. Les scourtins doivent être lavés selon la norme internationale en vigueur et à raison d'une fois par semaine pour éviter d'augmenter l'acidité de l'huile.

L'avantage de ce système est la production d'une huile pressée à froid de bonne qualité, riche en polyphénols ce qui permet une bonne conservation.

La capacité de stockage d'une unité doit être adaptée à sa capacité de trituration, les olives ne doivent pas dépasser plus de 3 jours dans l'unité.

On distingue les unités traditionnelles maâsras dont la pression est de l'ordre de 100 kg/cm², unités semi-modernes dont la pression est aux environs de 200 kg/cm² et les unités modernes équipées en super-presses pouvant développer une pression de 400 kg/cm² [19].

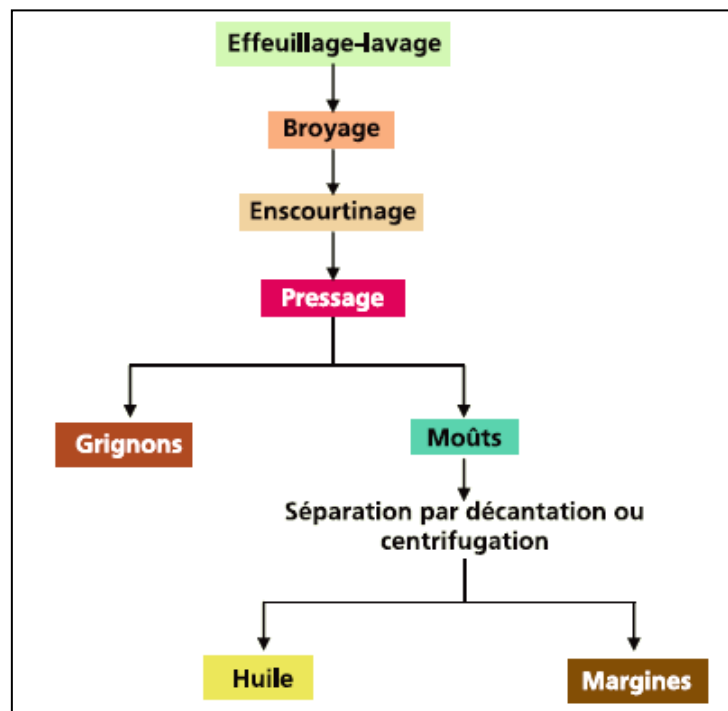


Figure 4: Procédé d'extraction des huiles végétales par presse[19]

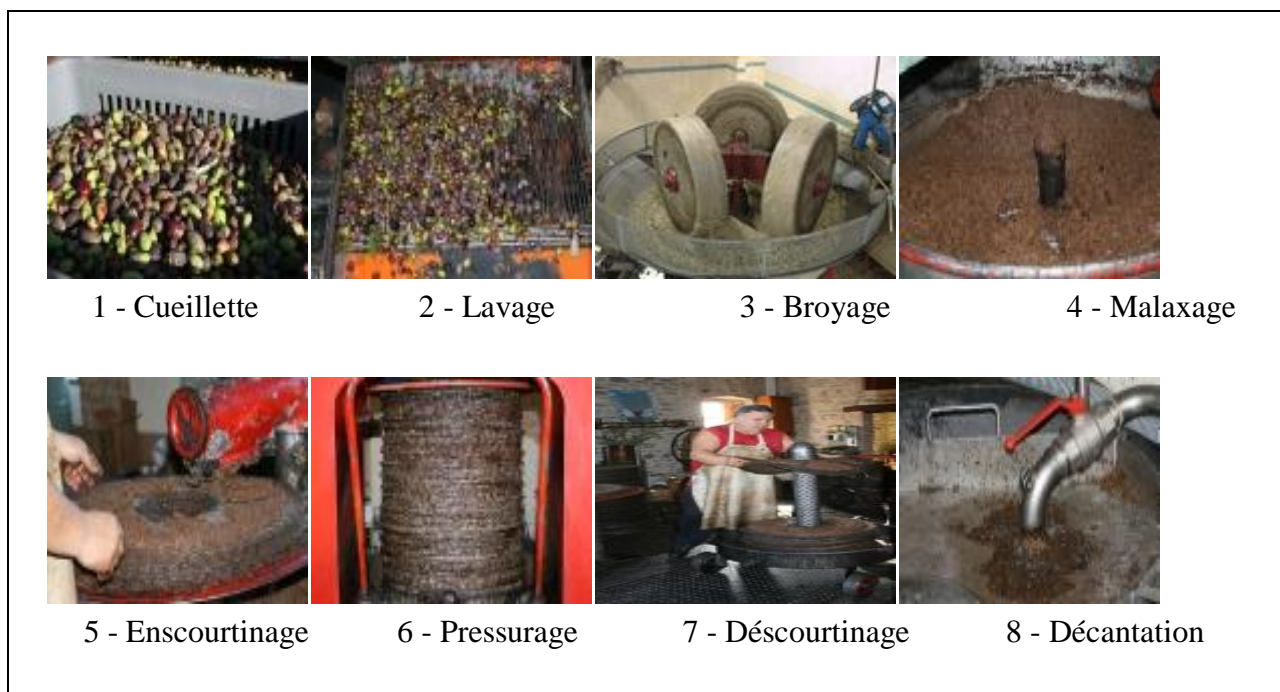


Figure 5 : Différentes étapes du procédé d'extraction des huiles végétales par presse [19]

IV.2. Les unités de trituration qui sont équipées en chaînes continues

L'extraction par centrifugation se fait dans un décanteur, une centrifugeuse horizontale, où les différents composants de la pâte se séparent selon leur densité.

Trois phases peuvent être obtenues selon le procédé continu utilisé :

- Le grignon ($\rho \sim 1.2 \text{ kg/dm}^3$) qui va dans la partie la plus éloignée de l'axe de tour,
- Les margines, ou eau de végétation ($\rho \sim 1.015 \text{ à } 1.086 \text{ kg/dm}^3$) qui se trouvent sur l'anneau intermédiaire,
- L'huile ($\rho \sim 0.916 \text{ kg/dm}^3$) qui reste autour de l'axe [19].

IV.2.1. Les unités de trituration qui sont équipées en chaînes continues à trois phases

Avec deux centrifugations, la première pour séparer les grignons et les huiles plus margines et la deuxième pour séparer les huiles et les margines (les trois phases sont les grignons, les margines et les huiles) [19].

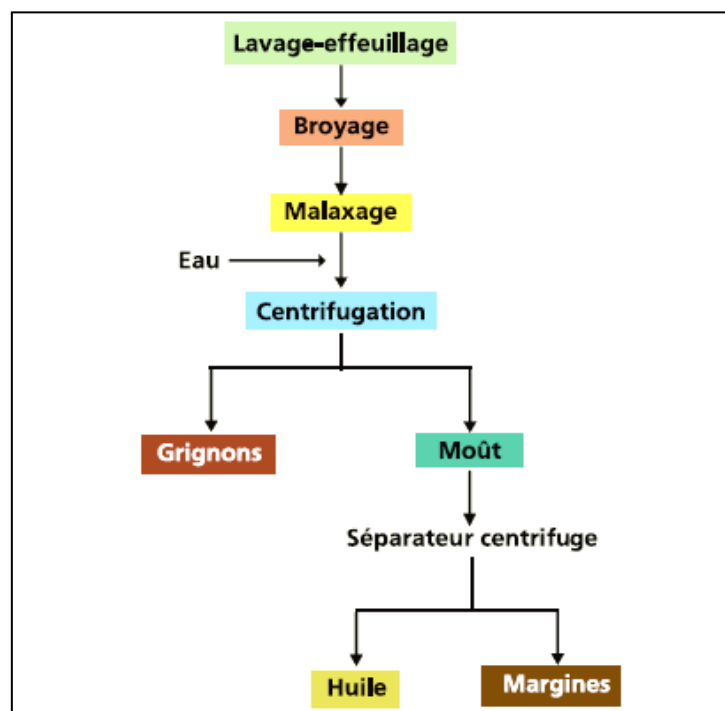


Figure 6: Procédé d'extraction en chaîne continue à trois phases [19]

IV.2.2. Les unités de trituration qui sont équipées en chaînes continues à deux phases

Avec une centrifugation permettant de séparer l'huile et les grignons humidifiés par les eaux de végétation provenant de l'olive (les deux phases sont les huiles et les grignons) [19].

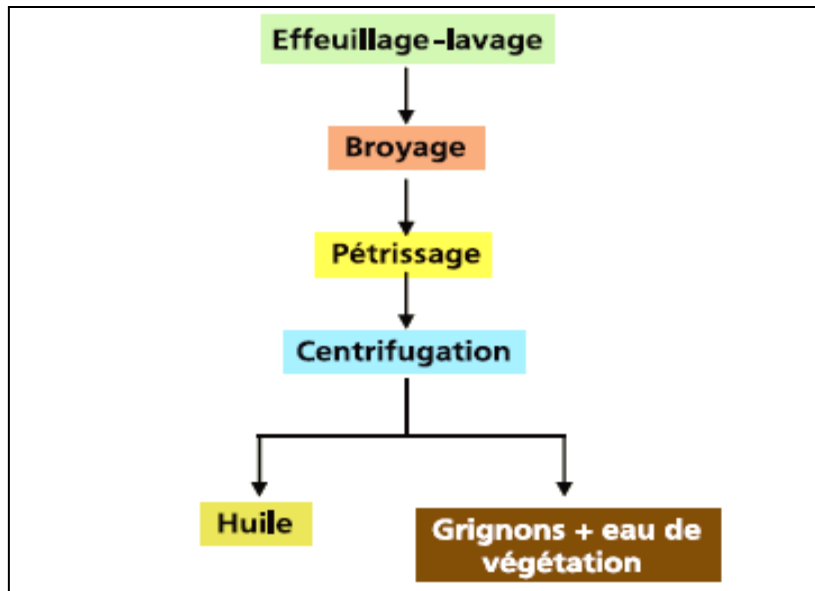


Figure 7: Procédé d'extraction en chaîne continue à deux phases [19]

Le tableau suivant donne un comparatif entre les 3 procédés d'extraction d'huile d'olive précédents :

Tableau 4: Comparaison des différents systèmes d'extraction de l'huile d'olive [12]

Système	Entrées	Quantité	Sorties	Quantité
Presse	Olive	1 Tm	Huile	200 kg
	Eau de lavage	100-120 l	Grignon (26 % eau, 7 % huile)	400-600 kg
	Énergie	40-60 KWh	Margines (88 % eau)	400-600 l
3 phases	Olive	1 Tm	Huile	200 kg
	Eau de lavage	100-120 l	Grignon (40 % eau, 4 % huile)	500-600 kg
	Eau ajoutée	700-1000 l	Margines (94 % eau, 1 % huile)	1000-1200 l
	Énergie	90-117 KWh		
2 phases	Olive	1 Tm	Huile	200 kg
	Eau de lavage	100-120 l	Grignon (60 % eau, 3 % huile)	800 kg
	Énergie	40-60 KWh	Eau de nettoyage Huile	100-150 l

V. Traitement des résidus de l'opération

À la fin de chaque opération, on obtient des résidus sous différentes formes selon le type d'extraction. Ces résidus peuvent être très polluants (les margines par exemples) ou peuvent encore contenir un taux assez élevé de gras (cas des tourteaux). Dans les deux cas, ils ne doivent pas être rejetés directement dans l'environnement et donc, ils subissent les traitements suivants :

V.1. Traitement des margines, ou résidu liquide, constituées des eaux de végétation de l'olive, souvent mélangées à de l'eau qu'on ajoute au cours de l'opération. Ces margines présentent un pouvoir polluant élevé ; elles doivent donc faire l'objet d'un traitement afin d'éviter les impacts négatifs sur l'environnement [12].

V.2. Traitement des grignons : Constitués de la pulpe, du noyau et du tégument de l'olive ; leur niveau d'humidité oscille entre 25 et 40%, et leur teneur en gras est d'environ 3-7% selon le procédé d'extraction employé. Le grignon peut être destiné à plusieurs utilisations [12]:

- Deuxième extraction de l'huile résiduelle dans l'industrie extractrice pour la production d'huile de grignon.
- Alimentation du bétail (ruminant : ovins, bovins, camélidés...).
- Combustible solide.

V.2.1. Traitement des grignons humides, résidu de consistance pâteuse à l'humidité supérieure à 60% ; ce résidu apparaît lorsqu'on utilise le système d'extraction à deux phases. En réalité, il s'agit ici d'un mélange de grignon et de margine nécessitant un séchage préalable afin d'être utilisé dans l'industrie de deuxième extraction, ou de systèmes de gestion spécifiques [12].

V.2.2. Traitement des grignons dénoyautés gras, que l'on obtient parfois en séparant le noyau et la pulpe du grignon. Le noyau s'avère un excellent combustible.

V.3. Traitement des restes végétaux et terreux, issus du lavage de l'olive venant d'être récoltée. Généralement, ces restes sont utilisés comme engrais organique et réincorporés dans la terre, avec ou sans compostage préalable [12].

En moyenne, le traitement de 100 kg d'olives produit environ 20 kg d'huile ; selon le cas, et les systèmes d'extraction, il produit également les effluents et sous-produits suivants [12]:

- 40 kg de grignon (taux d'humidité, environ 35%) plus de 40 kg d'eaux résiduelles, si l'on utilise le système traditionnel.
- 55 kg de grignon (taux d'humidité, 50%) plus 100 kg d'eaux résiduelles, si l'on utilise le système continu à trois phases.
- 70 kg de grignon (taux d'humidité, 60%) plus 10 kg d'eaux résiduelles, si l'on utilise le système continu à deux phases.

Chapitre 3:

Les équipements

A. Les presses

Une presse est une machine permettant de dégager une pression considérable. Celle-ci est utilisée, dans les huileries, pour l'expression des graines. On les classifie selon le procédé de fonctionnement : continu ou discontinu.

I. Presses pour procédés discontinus

Il existe plusieurs types de presses pour procédés discontinus, voici quelques-unes :

I.1. Presses Marseillaises

Les graines sont enfermées dans des sacs appelés « scourtins ». Ces sacs sont empilés les uns sur les autres et séparés entre eux par des plaques de tôle. Sous la pression, qui peut atteindre 250-300 kg/cm², l'huile filtre à travers les scourtins et s'écoule sur le plateau inférieur puis dans un récipient. On obtient ainsi une huile dite de première pression.

L'opération terminée, les scourtins sont enlevés, les tourteaux sont concassés et broyés et, après chauffage, sont remis en scourtins et soumis à une deuxième pression [36].

I.2. Presses Anglo-américaines

Tout comme les presses marseillaises, ces presses sont ouvertes; elles présentent toutefois l'avantage d'utiliser de simples surfaces filtrantes repliées sur le produit à traiter et qui sont d'un entretien plus facile que les scourtins. D'une façon générale on utilise ces presses plutôt pour la seconde pression [36].

I.3. Presses à cages

Ces presses sont de type fermé et elles permettent d'atteindre des pressions de l'ordre de 500 kg/cm². La matière y est reçue dans de grands récipients métalliques cylindriques (cages), dont le fond est fermé par le plateau inférieur de la presse hydraulique et dont les parois sont constituées par des barreaux métalliques verticaux juxtaposés et très rapprochés, ou par une enveloppe continue également métallique perforée d'une multitude de petits trous [36].

II. Presses pour procédés continus

On distingue deux types de presse pour une première pression à froid, en fonction de la vis et des orifices d'évacuation de l'huile : les presses à cylindre perforé (communément appelées « presses à vis ») et les presses en cage d'écureuil (généralement appelées « presses à barreaux »). Le prix de ces presses varie considérablement selon le type et le débit [20] :

II.1. Les presses à vis ou à tube perforé

Les presses dites « à tubes perforés » sont de faibles capacités (inférieure à 100 kg/h). L'extraction de l'huile se fait par compression des graines dans la chambre de la presse de façon croissante en direction du nez de presse. L'évacuation est permise par des orifices sur

la section terminale du cylindre. Le tourteau quant à lui, est évacué en bouchon en sortie de presse. Ce type de presse dispose d'un système de chauffage utilisé au démarrage, facilitant ainsi l'évacuation du tourteau et limitant les risques de bourrage. Ensuite, la température est maintenue par le fonctionnement de la presse entre 60 et 80°C [20].

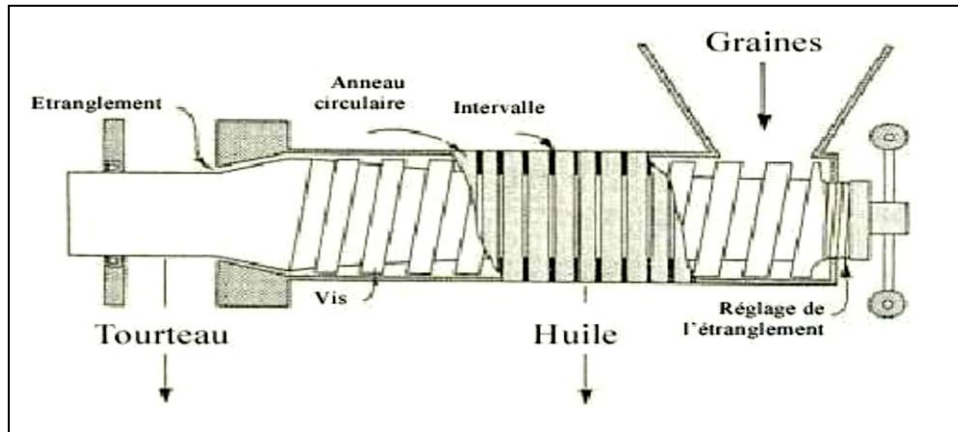


Figure 8: Presse à tubes perforés [20]

II.2. Les presses à barreaux

Les presses dites « en cage d'écureuil » disposent d'une vis dont le diamètre de l'axe augmente. Les graines sont donc écrasées entre la vis et le cylindre de la presse. L'huile s'évacue par les intervalles entre les anneaux circulaires, le tourteau s'évacue en forme de chips en bout de presse. Ces presses ont une capacité de trituration de 15 à 5000 kg de graines par heure. Le taux d'extraction en huile est généralement plus élevé avec ce type de presse, ce qui permet d'obtenir des tourteaux moins gras en sortie de presse [20].

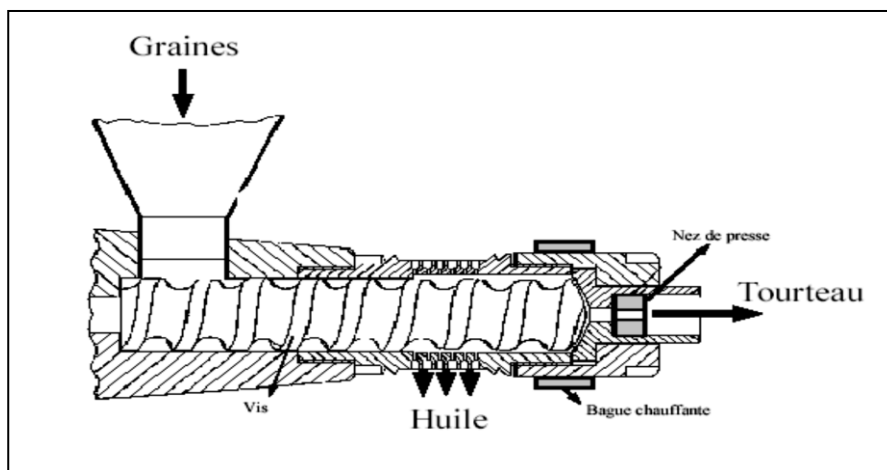


Figure 9: Presses à barreaux [20]

B. Les turbines à gaz

I. Définition

De même que les moteurs à explosion et les moteurs Diesel, les turbines à gaz (TAG) appartiennent à la catégorie des moteurs thermiques.

Une turbine à gaz est un moteur qui transforme l'énergie thermique des gaz chauds (la chaleur est généralement fournie par une combustion dans un générateur de gaz) en énergie mécanique de rotation utilisable sur l'arbre de la turbine (machines industrielles) ou sous forme d'énergie propulsive dans un jet (turboréacteurs)[39].

II. Principe de fonctionnement

La turbine à gaz est un moteur thermique réalisant les différentes phases de son cycle thermodynamique dans une succession d'organes traversés par un fluide moteur gazeux en écoulement continu. C'est une différence fondamentale par rapport aux moteurs à pistons qui réalisent une succession temporelle des phases dans un même organe (généralement un cylindre).

La turbine à gaz est normalement pourvue d'un moteur de lancement, c'est-à-dire de démarrage du compresseur conçu pour un rapport de pression fixé. Dès que la vitesse de rotation du compresseur est suffisante, il y a aspiration d'air atmosphérique. On préférera en pratique un compresseur de type hélicoïdal. Bien qu'il présente de plus faibles taux de compression entre étages qu'un compresseur centrifuge, il est en compensation moins cher et son rendement est meilleur [39].

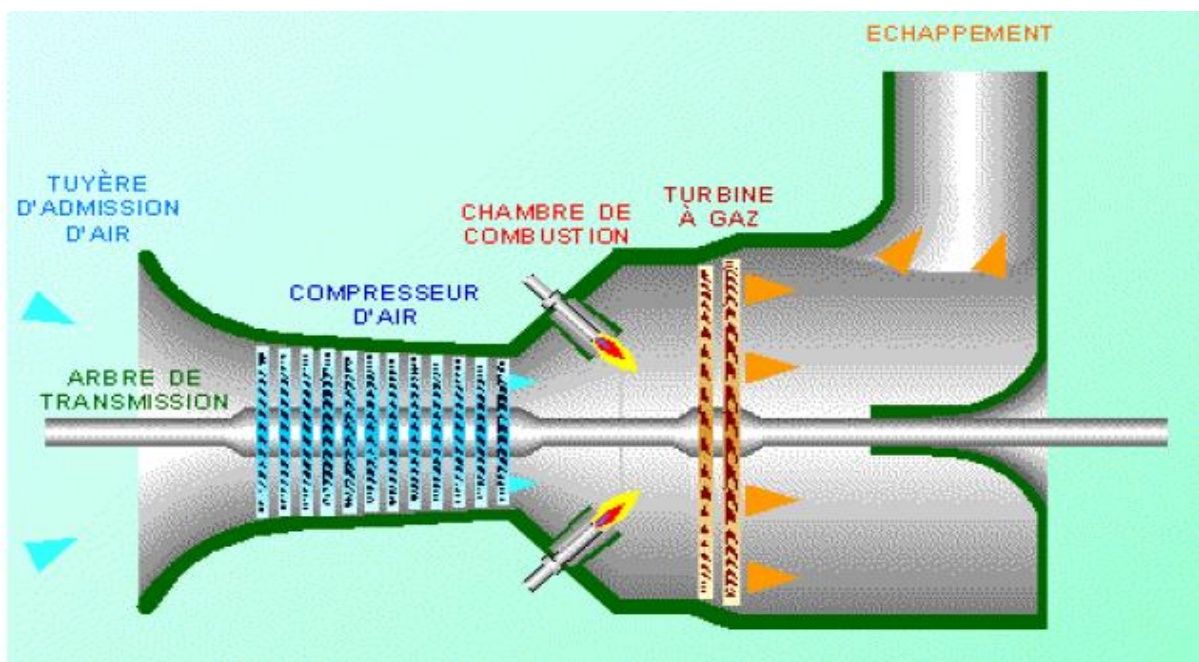


Figure 10: Principe de fonctionnement d'une turbine à gaz [5]

III. Types de turbines à gaz

Il existe une grande variété de turbines à gaz susceptibles d'être utilisées dans des domaines très divers. Les combinaisons de réalisation sont nombreuses. On caractérise leurs différences soit d'un point de vue de la constitution de l'installation, soit du point de vue du groupement des appareils [39].

On définit les catégories en fonction de plusieurs critères de classification :

III.1. Classification selon la circulation de l'agent moteur

- Les turbines à combustion interne; les gaz chauds, qui sont des fumées de combustion, sont, après leur détente dans la turbine, évacués au-dehors, soit directement, soit après le passage dans un échangeur ou s'effectue la récupération d'une partie de leur chaleur.
- Les turbines à combustion externe; le fluide évoluant reçoit la chaleur d'une source extérieure par l'intermédiaire d'un échangeur, il se détend ensuite dans la turbine, après refroidissement convenable, il est repris par un compresseur qui le renvoie dans l'échangeur ou il reçoit un nouvel apport de chaleur, et ainsi de suite.
- Les turbines à évolution mixte, qui comportent à la fois une évolution ouverte et une évolution fermée, mais elles semblent avoir été abandonnées [39].

III.2. Classification selon la source des gaz

- Les turbines à chambre de combustion.
- Les turbines avec échangeur.
- Les turbines à gaz d'échappement.
- Les turbines à générateurs à pistons libres [39].

III.3. Classification selon les caractéristiques de la turbine proprement dite

- Turbines axiales ou radiales, en fonction de la direction de l'écoulement de l'agent moteur.
- Turbine à action, à réaction ou mixtes, en fonction de la manière dont la détente se produit.
- Turbines à un ou plusieurs étages, en un ou plusieurs corps (haute pression, moyenne pression et basse pression) [39].

IV. Cycle thermodynamique

Les principaux éléments d'une turbine à gaz élémentaire sont schématisés sur les figures 11 et 12 dans deux configurations différentes: turbine à combustion interne, turbine à combustion externe.

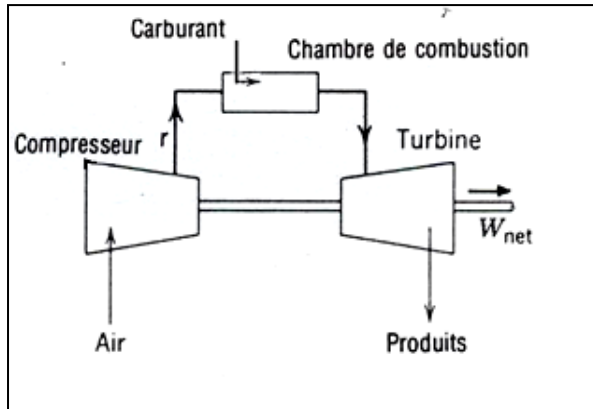


Figure 11: Turbine à gaz à combustion interne [21]

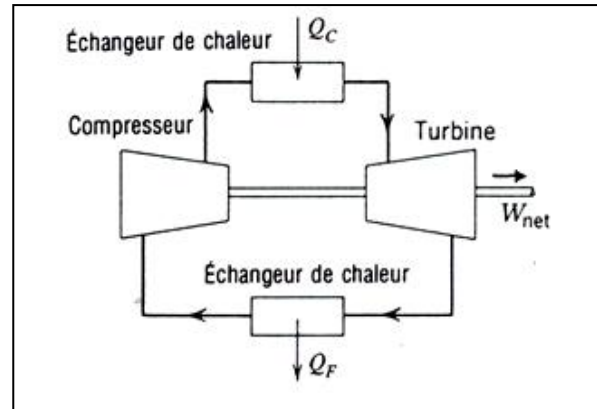


Figure 12: Turbine à gaz à combustion externe [21]

Et voici le cycle thermodynamique dans chaque configuration :

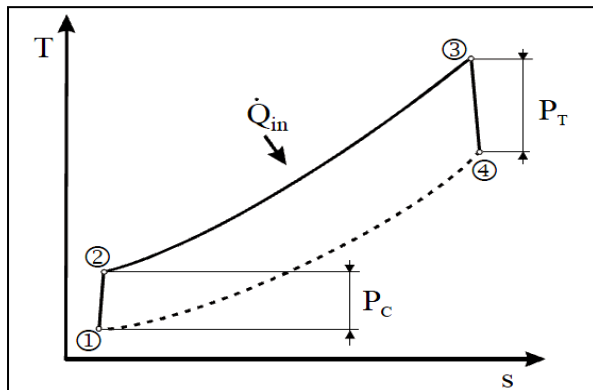


Figure 12: Cycle thermodynamique d'une turbine à combustion interne [21]

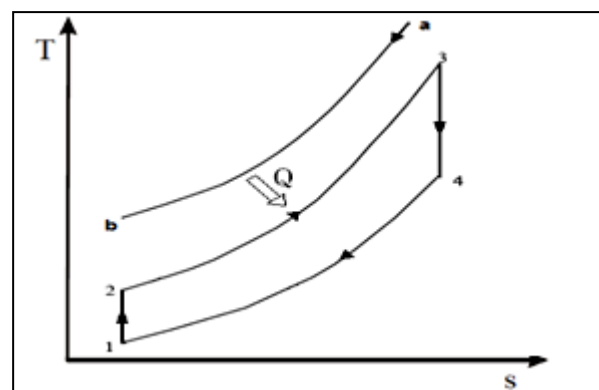


Figure 11: Cycle thermodynamique d'une turbine à combustion externe [21]

Le concept est expliqué thermodynamiquement par le cycle de Brayton (diagramme entropique TS) :

IV.1. Cas de la turbine à combustion externe

Le fluide de travail rentre dans le compresseur (point 1), il est comprimé (point 2), il reçoit une quantité de chaleur Q_{23} (point 3) dans son passage dans un échangeur de chaleur, se détend à travers la turbine (point 4), et retourne au compresseur après refroidissement.

Le processus de combustion (a) à (b) est supposé être sous une pression constante.

(1 à 2 et 3 à 4) présentent le fonctionnement idéal du système compresseur-turbine [21].

IV.2. Cas de la turbine à combustion interne

- Le compresseur aspire de l'air atmosphérique et le comprime isentropiquement de 1 en 2. Cette compression s'accompagne d'une première augmentation de température de T_1 à T_2 .
- L'air chaud pénètre ensuite dans la chambre de combustion où il sert de comburant pour permettre la combustion d'un combustible liquide ou gazeux. Au cours de cette phase, il y a apport d'une quantité de chaleur Q_{23} à pression constante, la température du mélange gazeux atteignant alors T_3 . Cette dernière température constitue la température maximale du cycle.
- Les gaz brûlés parviennent ensuite, à travers une tuyère qui leur permet d'acquérir une vitesse élevée dans les aubes de la turbine auxquelles ils cèdent leur énergie par détente isentropique : c'est le changement d'état 3 à 4 qui se traduit par une chute de température.
- Enfin, de 4 à 1, il y a évacuation de chaleur à l'extérieur du fait que les gaz brûlés sont rejetés dans l'atmosphère [21].

V. Avantages et inconvénients des turbines à gaz

Les applications des turbines à gaz sont très variées et leur fonctionnement n'exige qu'une alimentation en combustible et des systèmes de démarrage et d'échappement. Comparées à d'autres moteurs à combustion interne, les turbines à gaz présentent plusieurs avantages [21] :

- Aucun refroidissement externe ;
- Possibilité d'une variété de combustibles ;
- Démarrage rapide ;
- Faible encombrement et puissance élevée par rapport au poids ;
- Faible taux de vibrations ;
- Haute fiabilité nécessitant peu d'entretien ;
- Mise de fonds peu élevée.

Aucun moteur ne peut rivaliser avec celui de la turbine à gaz (autonomie, vitesse variable, démarrage fulgurant) jusqu'à la puissance de 150 MW. Au-dessus de cette limite, une turbine à vapeur s'impose [21].

Les turbines à gaz présentent les inconvénients suivants [21]:

- Faible rendement thermique individuel ;
- Débit élevé de gaz d'échappement chauds ;
- Nécessité d'un système de démarrage auxiliaire ;
- Niveau de bruit élevé.

Un autre inconvénient est la nécessité de brûler un combustible de bonne qualité (sauf dans une turbine à gaz à cycle fermé ou n'importe quel combustible est utilisable), soigneusement purifié, surtout si la température de fonctionnement est élevée car certains produits de combustion risqueraient d'entraîner la destruction rapide des aubes [21].

VI. La turbine à gaz à combustion externe (EFGT : Externally Fired Gas Turbine)

VI.1. Définition

L'idée de la combustion à l'extérieur de la turbine à gaz ne date pas d'hier. Au cours des années 1930 aux années 1960, les carburants propres comme le gaz naturel et le pétrole n'étaient pas disponibles à de bas prix pour la production d'énergie électrique. Par conséquent, les énergies non propres comme le charbon ont été directement brûlées dans des fours pour produire de l'énergie thermique et électrique. Dernièrement, comme les prix des carburants fossiles propres ne cessent de croître avec la baisse continue de la réserve de combustibles fossiles, le monde a commencé à étudier les carburants de remplacement autres que les sources d'énergie conventionnelles.

Les recherches dans le domaine énergétique se sont axées sur le développement de technologies d'énergies renouvelables utilisant la biomasse. Aux États-Unis dans le milieu de 1979, le développement des turbines à gaz à combustion externe a été lancé. Celles-ci sont généralement utilisées dans le domaine des faibles puissances comme le montre la figure ci-dessous. L'intérêt pour cette technologie de turbine à gaz est de plus en plus important [22].

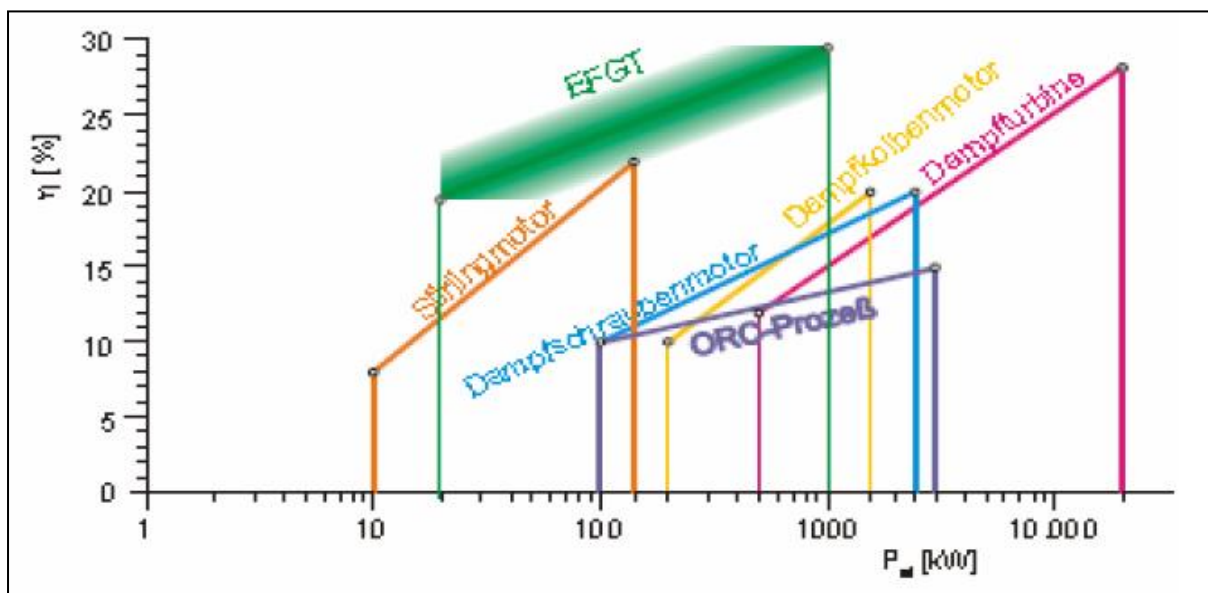


Figure 13: Efficacité électrique des EFGT par rapport aux technologies disponibles pour la production d'électricité à petite échelle à partir de la biomasse solide [21].

VI.2. Les types de turbine à gaz à combustion externe

La classification se fait selon le cycle qui peut être fermé ou ouvert [22]:

- Dans le cycle ouvert, le fluide de travail est rejeté dans l'environnement après un processus de refroidissement. Dans le cas de l'air, il peut être fourni à la chambre de combustion comme source de chaleur et d'oxygène.
- Dans le cycle fermé, le fluide de travail est renvoyé vers le compresseur après un processus de refroidissement.

VI.3. Avantages d'une turbine à gaz à combustion externe

En plus des avantages d'une turbine à gaz simple, celle à combustion externe connaît d'autres avantages très importants à savoir :

- Elle offre une très large gamme d'options de combustibles, l'utilisation de combustibles fossiles propres (gaz naturel) ou même le type non propre (charbon) et les différents types de biomasse, y compris les déchets combustibles ou le traitement des déchets solides et également les sources de chaleur nucléaire comme des réacteurs de fission et de radio-isotopes .

- La combustion se fait à pression atmosphérique, le but étant de chauffer le fluide de travail avant l'entrée dans la turbine. Cela simplifie le système et réduit les coûts de fabrication et d'exploitation.

- Pour le cycle ouvert, le fluide de travail de la turbine est surtout l'air pur, de sorte que l'encrassement ou l'érosion du compresseur ou de la turbine soient réduits au minimum. En outre, l'échangeur de chaleur est moins sensible que les pales de compresseur ou la turbine [22].

Il y a quelques avantages supplémentaires pour le cycle fermé:

- Le fluide de travail est distribué dans un cycle fermé. Par conséquent, il est possible d'utiliser différents types de fluides (autres que l'air) qui ont de bonnes caractéristiques de transfert de chaleur. L'azote, le dioxyde de carbone, l'hélium, l'argon, le krypton, le xénon et divers mélanges de gaz ont été proposés comme fluides de travail adaptés.

- Dans certaines applications où l'environnement a une petite quantité d'air ou sans air tout comme le sous-marin ou dans les applications spatiales, le cycle fermé avec différents types de fluides (autres que l'air) peut être utilisé avec un autre type de sources de chaleur.

- Ce cycle est parfaitement adapté à certaines applications où le fluide de travail pourrait être pollué ou contaminé et ne doit pas être rejeté dans l'environnement, par exemple dans les réacteurs nucléaires [22].

VII. Les microturbines à gaz

VII.1. Définition

Les microturbines à gaz sont de petites turbines à combustion externe qui produisent entre 20 kW et 500 kW de puissance. Les microturbines diffèrent à peine de la grosse turbine à gaz classique, elles fonctionnent selon le même principe. La plupart des microturbines ont un seul étage, ainsi que des dispositifs à flux radial, avec de grandes vitesses de rotation de 90.000 à 120.000 tr/min [23].

VII.2. Classement des microturbines

Les microturbines peuvent être classées en deux groupes :

- **Les microturbines avec récupérateur de chaleur** : la chaleur des gaz d'échappement est utilisée pour augmenter la température de l'air entrant dans la chambre de combustion et de ce fait le rendement de l'opération augmente.

- **Les microturbines sans récupérateur de chaleur dites à cycle simple** : le rendement et le coût de fabrication sont moins élevés que celui des microturbines avec récupérateur de chaleur [23].

La technologie de la microturbine à gaz avec récupérateur est prometteuse pour l'introduction du cycle de la turbine à gaz à combustion externe. De plus elle ouvre la possibilité d'utiliser la biomasse comme combustible.

La technologie de l'échangeur de chaleur de la turbine à gaz à combustion externe peut être utilisée dans la microturbine mais celui-ci fonctionnera à de plus hautes températures [23].

VII.3. Avantages et inconvénients des microturbines

En plus des avantages/inconvénients d'une turbine à gaz en général et d'une turbine à gaz à combustion externe, les microturbines connaissent les avantages/inconvénients suivants:

Tableau 5: Avantages et inconvénients des microturbines [23].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">• Un petit nombre de pièces mobiles.• Taille compacte.• Poids léger.• Un bon rendement lors de la cogénération.• Faible émission.• Peut utiliser un système de récupération de chaleur des gaz d'échappement.• Les intervalles d'entretien sont long 5000-8000 heures.	<ul style="list-style-type: none">• Perte de puissance et d'efficacité avec des températures ambiantes élevées.• Rendement électrique faible.

C. Les échangeurs de chaleur

I. Introduction

Dans une multitude de procédés industriels, comme dans notre environnement quotidien direct, nous sommes amenés à rencontrer des échangeurs thermiques (radiateurs de refroidissement des véhicules à combustion, évaporateurs et condenseurs de réfrigérateurs ménagers, ...). Ces organes ont pour rôle de transférer de la chaleur entre deux fluides qui sont à des températures différentes selon 3 modes:

- **Conduction** : Le processus de conduction de la chaleur s'effectue de proche en proche, la chaleur passant spontanément des corps les plus chauds aux corps les plus froids, la température tendant alors à s'uniformiser lorsqu'il n'y a pas de source de chaleur interne [14].
- **Convection** : Échange de chaleur entre une paroi et un fluide avec transport de la chaleur par le fluide en mouvement. Peut-être naturelle si le fluide circule verticalement sous l'effet de la poussée d'Archimède, ou bien forcée si le fluide circule artificiellement sous l'effet d'une pompe, turbine, ... [24].
- **Rayonnement** : Tout corps chauffé émet par sa surface de l'énergie sous forme de radiations électromagnétiques. Si cette énergie rencontre un corps absorbant, une partie de cette radiation est absorbée et transformée par ce corps en chaleur, une autre est réfléchie et une dernière est transmise. Il faut impérativement que la température du corps émetteur soit supérieure au corps absorbant [14].

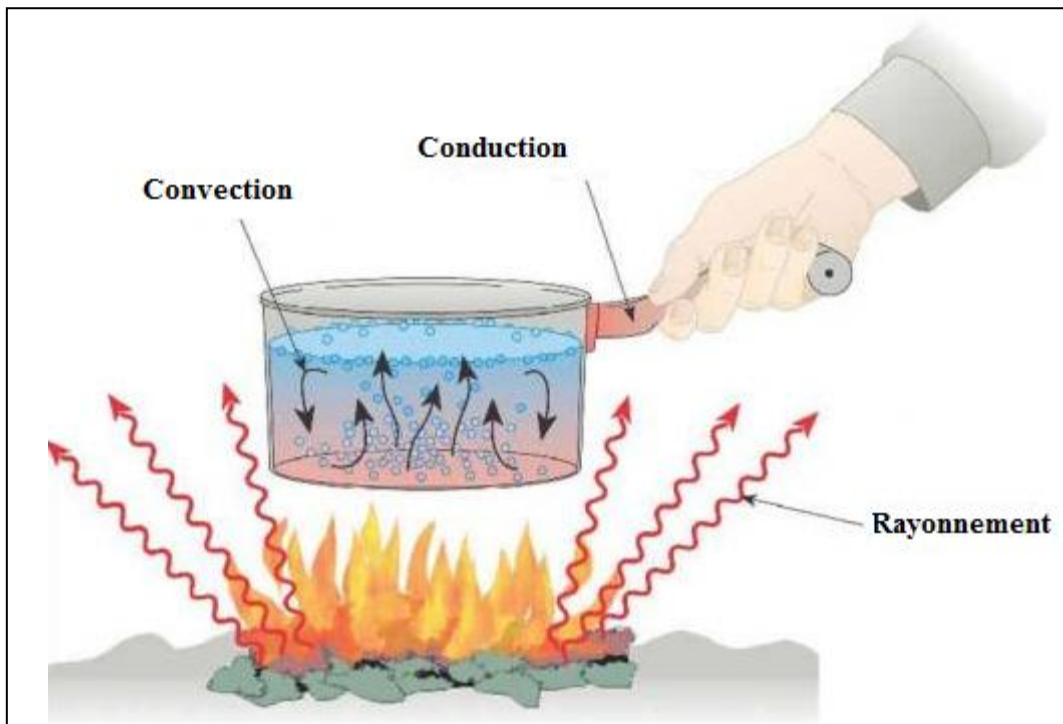


Figure 14: Modes de transfert de chaleur [25]

II. Définition d'un échangeur de chaleur

Les échangeurs de chaleur sont des appareils permettant de transférer de la chaleur entre deux fluides à des températures différentes. Dans la plupart des cas, les deux fluides ne sont pas en contact, et le transfert s'effectue à travers une surface d'échange. Au sein de la paroi séparatrice, le mécanisme de transmission de la chaleur est la conduction, et, sur chacune des deux surfaces de contact avec les fluides, ce sont presque toujours les phénomènes de convection qui prédominent.

Dans de nombreux cas, les fluides restent monophasiques, qu'ils soient gazeux ou liquides. Il existe toutefois trois grandes catégories d'échangeurs dans lesquelles surviennent des changements de phase : les vaporiseurs ou évaporateurs où l'on vaporise un liquide, les condenseurs où une vapeur est liquéfiée, et les vapo-condenseurs dans lesquels les deux fluides changent de phase [26].

III. Classification des échangeurs en fonction de leur configuration

Bien qu'il existe une très importante variété de modèles d'échangeurs, les quatre principales catégories utilisées dans les systèmes énergétiques sont les suivantes :

III.1. Les échangeurs à tube et à calandre (multitubulaires)

C'est de loin le type d'échangeur le plus répandu mais la part qu'il représente ne cesse de diminuer au profit de configurations plus efficaces. Dans ce type d'échangeurs, l'un des fluides circule dans un réservoir autour de tubes qui le traversent tandis que l'autre fluide circule à l'intérieur des tubes. Le modèle le plus simple sera constitué d'un réservoir dans lequel sera plongé un serpentin. Le modèle le plus courant est constitué d'un faisceau de tubes traversant un réservoir de manière longitudinale. On parle alors d'échangeur multitubulaire. Des parois bien placées permettent de forcer la circulation du fluide à travers les tubes de manière à ce qu'il effectue un ou même plusieurs aller-retour [27].

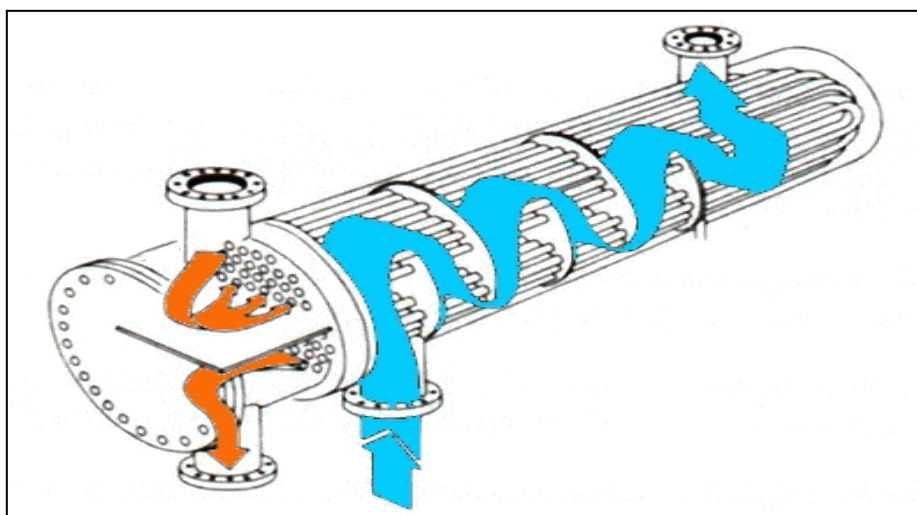


Figure 15: Échangeur à tubes et à calandre
Calandre à une passe avec chicanes
Faisceau de tubes en U à deux passes [28]

III.2. Les échangeurs tubulaires coaxiaux

Dans cette configuration, l'un des fluides circule dans le tube central tandis que l'autre circule dans l'espace annulaire entre les deux tubes. On trouve assez souvent ce type d'échangeurs dans l'industrie frigorifique en particulier pour les condenseurs à eau ou encore les groupes de production d'eau glacée [27].

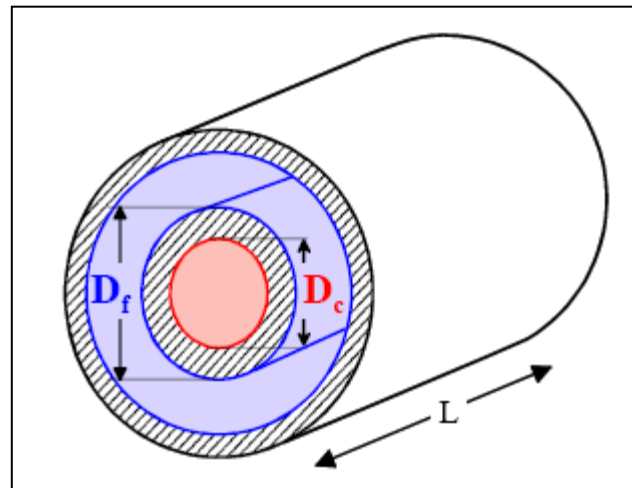


Figure 16: Échangeur à tubes coaxiaux [27]

III.3. Les échangeurs à ailettes

Un échangeur à ailettes est un échangeur relativement simple : il consiste en un conduit cylindrique ou rectangulaire sur lequel sont fixées des lames métalliques de différentes formes. Le fluide de refroidissement est généralement l'air ambiant. La chaleur est transférée du fluide chaud circulant dans le conduit principal aux lames métalliques par conduction thermique ; ces lames se refroidissent au contact de l'air. Ce type d'échangeur est utilisé pour le chauffage dans les bâtiments : de l'eau est chauffée dans l'installation de chauffage et circule dans des radiateurs qui sont des échangeurs à ailettes. On utilise aussi ce type d'installation pour refroidir les moteurs de voiture ou encore les moteurs en tout genre. Dans ce dernier cas, la chaleur due aux frottements ainsi qu'à l'induction magnétique (cas d'un moteur électrique) est directement transférée à la protection extérieure du moteur qui possède des ailettes fixées à sa surface. Le transfert thermique est limité surtout du côté du fluide de refroidissement par manque d'un dispositif de circulation : l'air circule essentiellement par convection naturelle autour de l'échangeur. Cette limitation peut cependant être supprimée par ajout d'un dispositif de ventilation. Cet échangeur est particulièrement simple et peut prendre des formes spécifiques, ce qui le rend intéressant dans l'électronique [10].



Figure 17: Échangeur à ailettes [29]

III.4. Les échangeurs à plaques

Les échangeurs à plaques sont constitués de plaques formées dont les alvéoles constituent les chemins empruntés par les fluides. Les plaques sont assemblées de façon que le fluide puisse circuler entre elles. La distribution des fluides entre les plaques est assurée par un jeu de joints de telle sorte que chacun des deux fluides soit envoyé alternativement entre deux espaces inter-plaques successifs.

Les fluides peuvent ainsi échanger de la chaleur à travers les plaques. La figure 4 illustre le fonctionnement d'un tel échangeur. L'avantage principal de ce type d'échangeur est la compacité. En effet, on voit bien que ce dispositif permet une grande surface d'échange dans un volume limité, ce qui est particulièrement utile lorsque des puissances importantes.

Les échangeurs à plaques sont très utilisés dans l'industrie agroalimentaire (pasteurisation du lait) ou l'industrie nucléaire. Les plaques sont généralement en acier inoxydable en particulier dans l'agroalimentaire pour des raisons évidentes d'hygiène et de santé publique. À noter que l'utilisation de joints en matières organiques réduit la gamme de températures de fonctionnement [27].

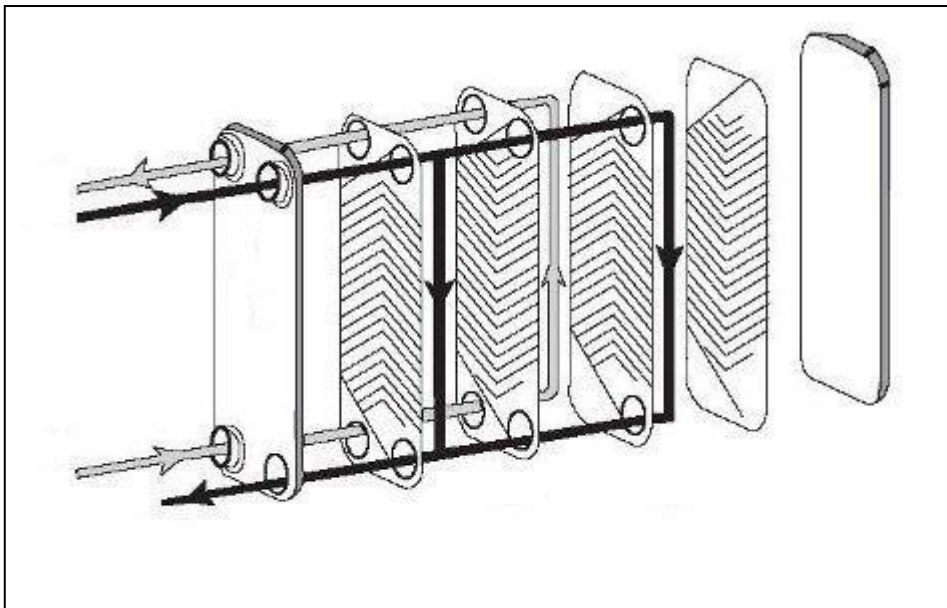


Figure 18: Échangeur à plaques [30]

IV. Classement des échangeurs en fonction de la circulation des fluides

IV.1.Échangeur à co-courant (courant parallèle)

Les deux fluides sont disposés parallèlement et vont dans le même sens.

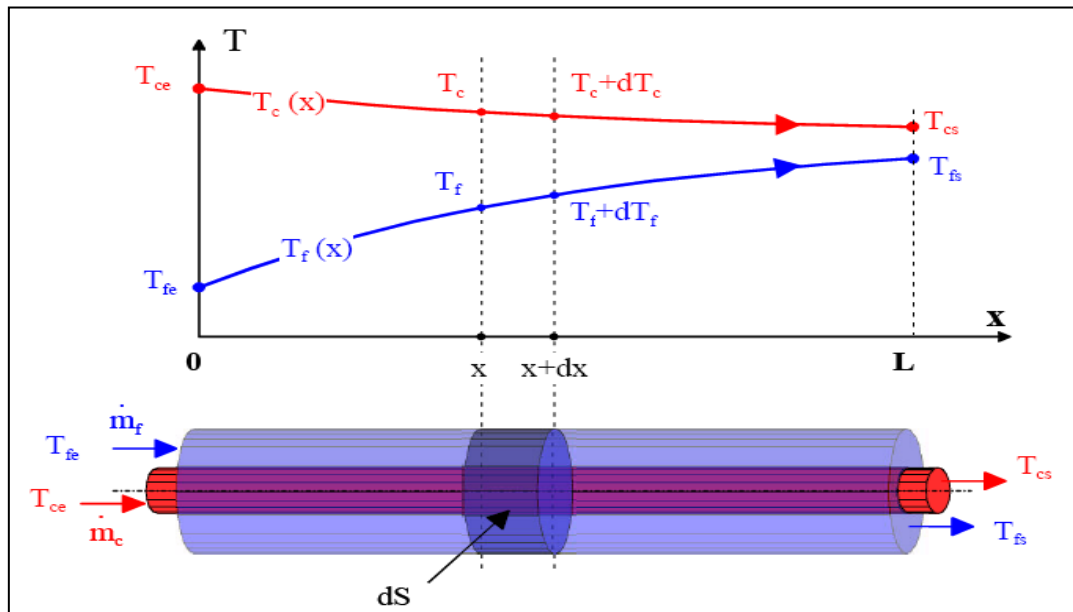


Figure 19: Évolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur co-courant [31]

IV.2.Échangeur à contre-courant

Les deux fluides sont disposés parallèlement mais vont dans des sens opposés.

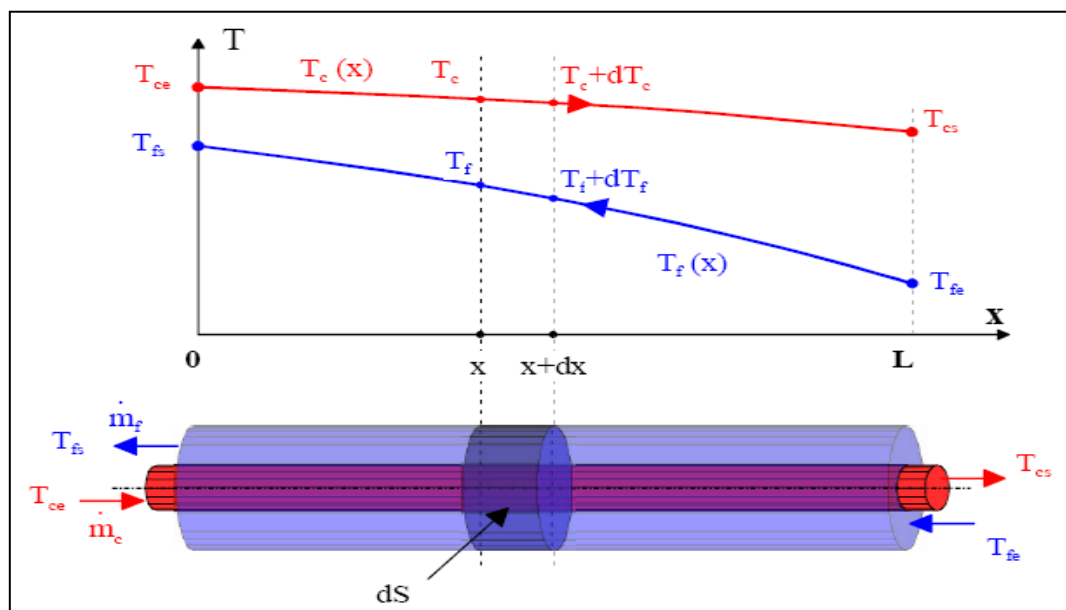


Figure 20: Évolution des températures du fluide chaud et du fluide froid le long d'un échangeur contre-courant [31]

IV.3.Échangeur à courant croisé

Dans ce type d'échangeurs, l'un des fluides circule dans une série de tubes tandis que l'autre fluide circule perpendiculairement autour des tubes. Dans la plupart des cas, c'est un liquide qui circule dans les tubes tandis que c'est un gaz qui circule autour.

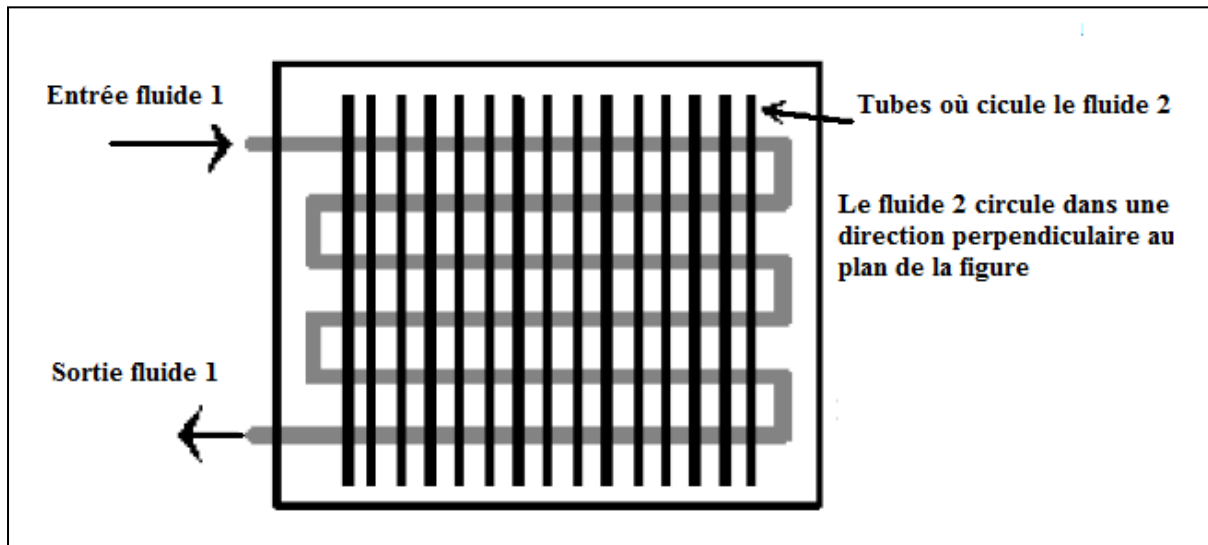


Figure 21: Échangeur à courant croisé [27]

Chapitre 4: Les énergies renouvelables

I. Introduction

Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales et génèrent des emplois. Le solaire (solaire photovoltaïque, solaire thermique), l'hydroélectricité, l'éolien, la biomasse, la géothermie sont des énergies flux inépuisables par rapport aux « énergies stock » tirées des gisements de combustibles fossiles en voie de raréfaction : pétrole, charbon, lignite, gaz naturel [32].

II. Énergie solaire

L'énergie solaire peut être exploitée sous deux formes différentes : l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie solaire thermique.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (Wc) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur. L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau. Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles ils se trouvent.

L'énergie solaire thermique a pour principe de convertir en chaleur le flux solaire par le biais de capteurs solaires thermiques. Cette énergie peut être utilisée pour le chauffage, mais également pour produire de l'électricité [32].

III. Hydroélectricité

À l'image des moulins à eau de jadis, l'hydroélectricité ou production d'électricité par captage de l'eau est apparue au milieu du XIXe siècle. L'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique qui injecte les Kilowattheures sur le réseau.

L'énergie hydraulique représente 19% de la production totale d'électricité. C'est la source d'énergie renouvelable la plus utilisée. Cependant, tout le potentiel hydroélectrique mondial n'est pas encore exploité [32].

IV. Géothermie

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur.

En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C)[32].

V. Énergie éolienne

Comme les moulins à vent du passé, les éoliennes génèrent des forces mécaniques ou électriques. Les pales du rotor des grandes éoliennes ou aérogénérateurs captent l'énergie cinétique du vent et entraînent un générateur électrique pour produire des kilowattheures propres et renouvelables. Une éolienne de nouvelle génération développe en général une puissance d'environ 2 MW. Chaque machine de 2MW est capable d'alimenter environ 2 000 foyers [32].

VI. Biomasse

VI.1. Définition

La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale. Cette matière peut être valorisée de différentes manières : industrielle (bois de construction, papier, chimie végétale...), énergétique (chaleur, électricité, carburant,...), alimentaire et esthétique ou participer à l'équilibre écologique.

La biomasse n'est considérée comme une source d'énergie renouvelable que si elle se régénère dans les mêmes proportions qu'elle est utilisée [32].

VI.2. La biomasse-énergie

La valorisation énergétique de la biomasse conduit à trois formes d'énergie utile, en fonction du type de biomasse et des techniques mises en œuvre: la chaleur, l'électricité (ou les deux combinées en cas de cogénération) ainsi que la force motrice de déplacement (les biocarburants).

Les différents types de biomasse présentent des caractéristiques physiques très variées : solide (paille, copeaux, bûches), liquide (huiles végétales, bioalcool), gazeux (biogaz). L'humidité est déterminante pour le choix de la filière de conversion énergétique, à un point tel que, à côté de la valorisation sous forme de biocarburants, on distingue deux filières principales de valorisation énergétique de la biomasse: la voie sèche et la voie humide [33].

VI.3. Filières de valorisation

La biomasse est valorisée sous trois formes possibles :

VI.3.1. La voie sèche

La voie sèche est principalement constituée par la filière thermochimique, qui regroupe les technologies:

- **Combustion**

La combustion est l'oxydation complète du combustible, en général en présence d'un excès d'air, et produit de la chaleur. Les techniques de combustion de la biomasse solide, sont nombreuses. Dans le cas des chaudières, la chaleur est transférée à un medium caloporteur, souvent l'eau. L'eau chaude ou la vapeur ainsi obtenues sont utilisées dans les procédés industriels ou dans les réseaux de chauffage urbain. La vapeur peut également être envoyée dans une turbine ou un moteur à vapeur pour la production d'énergie mécanique ou, surtout, d'électricité. La production combinée de chaleur et d'électricité est la cogénération [33].

- **Pyrolyse**

La pyrolyse est la décomposition thermique de la matière carbonée sous vide ou sous atmosphère inerte (absence d'air ou air fortement réduit). Elle conduit à la production d'un solide, le charbon de bois ou le charbon végétal, d'un liquide, l'huile pyrolytique, et d'un gaz combustible. La conduite de la pyrolyse peut être orientée vers la maximisation de la production de charbon [33].

- **Gazéification**

La gazéification de la biomasse solide est également une décomposition thermique de la matière, mais en atmosphère réductrice (les quantités d'air sont réduites). Cette gazéification est réalisée dans un réacteur spécifique, le gazogène. Le résultat est la transformation complète de la matière solide, hormis les cendres, en un gaz combustible. Ce gaz, après épuration et filtration, est alors brûlé dans un moteur à combustion interne pour la production d'énergie mécanique ou d'électricité. La puissance des gazogènes varie d'une dizaine de kW à quelques MW. La cogénération est également possible avec la technique de la gazéification [33].

VI.3.2. La voie humide

La principale filière de cette voie est la bio-méthanisation. Celle-ci est une digestion anaérobie de la matière organique réalisée dans un réacteur appelé digesteur. Ce biogaz (méthane) est brûlé en chaudière pour la production de chaleur ou dans un moteur à combustion interne pour la production d'électricité ; il est également possible de combiner chaleur et électricité. Le résidu solide de la digestion anaérobie peut être utilisé comme amendement organique en agriculture en fonction de sa composition chimique et de ses teneurs éventuelles en métaux lourds ou contaminants [33].

VI.3.3. Les cultures énergétiques (les biocarburants)

Certaines cultures énergétiques visent à produire des biocarburants. C'est ainsi que l'on peut transformer les céréales ou les plantes riches en sucre (canne, betterave) en bioéthanol. Celui-ci peut être utilisé directement comme carburant dans des moteurs adaptés, ou transformé en ETBE, qui lui est introduit dans l'essence.

D'autres cultures, oléagineuses, produisent des huiles végétales : colza, lin, etc. Ces huiles, après raffinage ou transestérification, deviennent un biodiesel, qui peut être utilisé tel quel ou en mélange au diesel pétrolier [33].

VI.4. Caractéristiques physico-chimiques de la biomasse

Chaque type de biomasse présente des caractéristiques uniques. Les caractéristiques physico-chimiques de la biomasse doivent permettre de définir, pour chaque catégorie, sa compatibilité avec une filière considérée et le potentiel énergétique qui peut être valorisé [33].

VI.4.1. Teneur en humidité

C'est la quantité d'eau que l'on trouve dans la biomasse, et qui est exprimée en pourcentage de son poids total. Elle peut aller de moins de 10%, pour certaines pailles, jusqu'à 70% pour les résidus forestiers.

La teneur en humidité influe sur la conservation de la matière et sur son contenu énergétique. L'humidité est déterminante pour le choix de la filière de conversion énergétique [33].

VI.4.2. Teneur en cendres

Les cendres sont les résidus de la combustion du bois. Elles représentent la teneur inorganique de la biomasse. C'est un paramètre prépondérant dans le cas de la combustion, car la biomasse est d'autant plus adaptée à la combustion que sa teneur en cendre est faible.

Les principaux problèmes liés aux cendres sont leur évacuation, qui doit être en adéquation avec le végétal utilisé, ainsi que leur composition, qui, dans certains cas, peut entraîner des phénomènes de corrosion.

La teneur en cendres peut également augmenter avec la présence de terre ou de cailloux provenant de la manutention de la biomasse. De ce fait, le taux de cendres dépend autant du lieu de production et des procédés de collecte et de stockage que du produit lui-même[33].

VI.4.3. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est une mesure de l'énergie (Joules) par quantité de matière (kilogrammes). Il varie en fonction de la nature de la biomasse, et de sa teneur en carbone et en humidité. Il est le plus souvent égal à un dixième de celui des combustibles fossiles.

Le pouvoir calorifique est une donnée primordiale, car c'est la quantité d'énergie théoriquement récupérable lors de sa combustion [33].

VI.4.4. Masse volumique

C'est le poids de la ressource par unité de volume. On compte deux types différents de masse volumiques :

- La masse volumique réelle : qui est celle du végétal, et dépend de son humidité.
- La masse volumique apparente : qui est celle du mètre cube apparent. Elle tient compte du vide entre les particules, et dépend de la granulométrie [33].

VI.4.5. Granulométrie

La granulométrie décrit les dimensions d'un combustible. Elle est caractérisée par trois grandeurs : les cotes moyennes des morceaux de la fraction la plus importante ; le pourcentage de fines poussières; et le pourcentage et la longueur maximale de gros morceaux. La granulométrie détermine les solutions techniques pour le transport, le stockage et la combustion. De manière générale, plus la granulométrie est homogène, plus la technologie est simple [33].

VI.4.6. Composition

Les éléments contenus dans la biomasse sont le plus souvent le carbone, l'oxygène et l'hydrogène avec une petite quantité d'azote. Elle se compose de polymères (cellulose, hémicellulose, lignine, etc.), de résines et de tanins. La composition moyenne donnée ci-dessous est généralement retenue pour la fraction organique anhydre des produits de type biomasse [33]:

- Carbone 49,0 %
- Hydrogène 5,5 %
- Oxygène 45,3 %
- Azote 0,2 %.

Partie II:
Conception et dimensionnement
du Mobilab

Nomenclature Partie II

Unité d'extraction par entrainement à la vapeur

Nom	Description	Unité
Jr	Jour	-
A	Surface d'échange du serpentin	[m ²]
D'	Diamètre de la base du décanteur	[m]
H ₁	Hauteur de la partie supérieure du décanteur	[m]
H ₂	Hauteur de la partie inférieure du décanteur	[m]
U	Coefficient d'échange global de chaleur	[W/K.m ²]
d	Diamètre interne du serpentin	[m]
d'	Diamètre d'étranglement du décanteur	[m]
l	Longueur d'un tube du serpentin	[m]

Unité d'extraction a l'hexane

Nom	Description	Unité
ΔH_1	Enthalpie échauffement hexane liquide	[J/Kg]
ΔH_2	Enthalpie vaporisation hexane	[J/Kg]
ΔH_3	Enthalpie échauffement hexane vapeur	[J/Kg]
A ₁	Surface d'échange du condenseur lors de la désurchauffe	[m ²]
A ₂	Surface d'échange du condenseur lors de la condensation	[m ²]
A ₃	Surface d'échange du condenseur lors du refroidissement	[m ²]
A _{totale}	Surface d'échange totale du condenseur	[m ²]
C _{p<liq< sub=""></liq<>}	Capacité calorifique hexane liquide	[J/Kg.K]
C _{p_{vap}}	Capacité calorifique hexane vapeur	[J/Kg.K]
D	Diamètre intérieur de la conduite	[m]
DTLM ₂	Différence de température logarithmique moyenne lors de la condensation	[K]

$DTLM_3$	Différence de température logarithmique moyenne lors du refroidissement	[K]
\dot{G}_g	Flux massique de l'hexane gazeux	[kg/s.m ²]
\dot{G}_l	Flux massique de l'hexane liquide	[kg/s.m ²]
Gr	Nombre de Grashof	-
M_{hexane}	Masse molaire de l'hexane	[g/mol]
Pr _l	Nombre de Prandtl de l'hexane liquide	-
$Q_{biomasse}$	Puissance fournie par la biomasse pour la vaporisation de l'hexane	KW
Q_T	Chaleur totale vaporisation hexane	[J/kg]
T_r	Température réduite de l'hexane	[K]
U_1	Coefficient d'échange global de chaleur lors de la désurchauffe	[W/K.m ²]
U_2	Coefficient d'échange global de chaleur lors de la condensation	[W/K.m ²]
U_3	Coefficient d'échange global de chaleur lors du refroidissement	[W/K.m ²]
V_{ballon}	Volume du ballon d'hexane	[L]
$V_{caisson}$	Volume d'un caisson	[m ³]
h_2	Coefficient de convection de l'hexane lors de la condensation	[W/K.m ²]
h_3	Coefficient de convection de l'hexane lors du refroidissement	[W/K.m ²]
h_{air}	Coefficient de convection de l'air à 20°C	[W/K.m ²]
$\dot{m}_{biomasse}$	Débit de biomasse brûlée	[Kg/h]
\dot{m}_l	Débit massique de l'hexane liquide	[kg/h]
\dot{m}_g	Débit massique de l'hexane gazeux	[kg/h]
\dot{v}_{hexane}	Débit volumique de l'hexane	[m ³ /h]
t	Temps de vaporisation de l'hexane	[s]
t_{manip}	Temps de manipulation	[h]
$t_{séjour}$	Temps de séjour de l'hexane dans le ballon	[s]
λ_l	Conductivité thermique de l'hexane liquide	[W/m.K]
μ_l	Viscosité dynamique de l'hexane liquide	[kg/m.s]
ρ_l	Masse volumique de l'hexane liquide	[kg/m ³]
ρ_g	Masse volumique de l'hexane gazeux	[kg/m ³]

Unité d'extraction de l'huile d'olive

Nom	Description	Unité
A	Section de passage dans la calandre	$[m^2]$
Cp_{air}	Capacité calorifique de l'air	$[J/Kg.K]$
D	Diamètre de la calandre	$[m]$
$DTLM$	Différence de température logarithmique moyenne	$[K]$
M_{air}	Masse molaire de l'air	$[kg/mol]$
$M_{biomasse}$	Masse molaire de la biomasse	$[g/mol]$
Nu	Nombre de Nusselt	-
P_1	Pression d'entrée compresseur	$[bar]$
P_2	Pression sortie compresseur	$[bar]$
P_3	Pression d'entrée turbine	$[bar]$
P_4	Pression de sortie turbine	$[bar]$
P_{air}	Pression de l'air à l'intérieur de la calandre	$[bar]$
Pr	Nombre de Prandtl	-
Q	Puissance fournie par la biomasse pour l'échangeur de chaleur	$[KW]$
R	Constante des gaz parfaits	$[J/mol.K]$
Ra	Nombre de Rayleigh	-
Re	Nombre de Reynolds	-
$R_{encrassement}$	Résistance d'encrassement de l'air dans les tubes	$[K.m^2/W]$
S	Surface d'échange de l'échangeur de chaleur	$[m^2]$
T_1	Température d'entrée du compresseur	$[K]$
T_2	Température de sortie du compresseur	$[K]$
T_{2th}	Température théorique sortie compresseur	$[K]$
T_3	Température d'entrée turbine	$[K]$
T_4	Température de sortie turbine	$[K]$
T_{4th}	Température théorique de sortie turbine	$[K]$
T_5	Température d'entrée air chaud dans l'échangeur de chaleur	$[K]$

T_6	Température sortie air chaud de l'échangeur de chaleur	[K]
T_{air}	Température de l'air à l'intérieur de la calandre	[K]
T_{ext}	Température extérieure au tube	[K]
T_{moy}	Température moyenne du tube	[K]
T_p	Température à la paroi du tube	[K]
U	Coefficient d'échange global de chaleur	[W/K.m ²]
b	Distance entre deux chicanes	[m]
d_e	Diamètre extérieur des tubes	[m]
d_i	Diamètre intérieur des tubes	[m]
e	Épaisseur de la chicane	[m]
h_1	Coefficient d'échange de chaleur coté tube	[W/K.m ²]
h_2	Coefficient d'échange de chaleur coté calandre	[W/K.m ²]
\dot{m}_{air}	Débit massique de l'air qui passe dans la turbine	[Kg/s]
$\dot{m}_{air\ chaud}$	Débit d'air qui passe dans l'échangeur coté tube	[Kg/h]
$\dot{m}_{air\ froid}$	Débit d'air qui passe dans l'échangeur coté calandre	[Kg/h]
\dot{m}_{air_s}	Débit d'air dans les conditions stœchiométriques	[Kg/h]
$\dot{m}_{biomasse}$	Débit de biomasse brûlée	[Kg/h]
n_{air}	Nombre de mole d'air	[mol]
$n_{biomasse}$	Nombre de mole de biomasse	[mol]
n_{O_2}	Nombre de mole d'oxygène	[mol]
p	Pas entre deux tubes	[m]
v	Vitesse de l'air à l'intérieur de la calandre	[m/s]
x_1	Distance entre la calandre et la première rangée de tubes (coté largeur)	[cm]
x_2	Distance entre la calandre et la première rangée de tubes (coté longueur)	[cm]
p_{net}	Puissance nette de la turbine	[KW/kg]
β	Coefficient d'expansion thermique	[K ⁻¹]
γ	Rapport des chaleurs spécifiques	-
ξ_s	Rapport de richesse	-
η_c	Rendement isentropique du compresseur	-
η_T	Rendement isentropique de la turbine	-

λ	Conductivité thermique de l'air	[W/m.K]
μ	Viscosité dynamique de l'air	[kg/m.s]
ρ_{air}	Masse volumique de l'air	[kg/m ³]
ω_c	Travail du compresseur	[KJ/Kg]
ω_T	Travail de la turbine	[KJ/Kg]
ω_{net}	Travail net de la turbine	[KJ/Kg]

Objectif de l'étude

Nous avons pour premier objectif de donner suite aux travaux antérieurs effectués au sein du Laboratoire de Valorisation des Énergies Fossiles, s'intitulant "Potentiel d'Intégration des Énergies Renouvelables dans une Unité d'extraction des Huiles Essentielles".

Nous apporterons des améliorations et ce, en intégrant le procédé d'extraction par solvant volatil.

Le second objectif est de démontrer si la biomasse est capable de fournir les besoins énergétiques nécessaires afin de produire le travail mécanique utile au fonctionnement d'une presse pour l'extraction de l'huile végétale; nous choisirons dans notre cas l'huile d'olive.

L'unité que nous concevrons doit être donc :

- Énergétiquement autonome ;
- Utilisant des sources d'énergie disponibles, propres et renouvelables ;
- Économe en eau ;
- Technologiquement réalisable.

Afin de répondre à ces exigences, nous utiliserons :


- La biomasse résiduelle de l'extraction pour produire de la vapeur. Cela nous évitera de rejeter des plantes dans la nature et nous permettra d'utiliser les cendres obtenues par la combustion comme engrais.
- Le solaire photovoltaïque pour produire l'électricité nécessaire à notre unité, ce qui nous permet d'exploiter une ressource abondante et propre.
- De l'air plutôt que de l'eau pour la condensation des vapeurs (eau, hexane) selon le type d'extraction utilisée.

Parallèlement à ces objectifs, l'idée est d'avoir une unité mobile, ce qui nous permet de :

- Réduire au maximum les frais de transport et de stockage de la matière végétale ;
- Éviter la dégradation du substrat végétal après cueillette lors des manipulations ;
- S'adapter au site du moment qu'il est préconisé pour ce type d'installation de mener les extractions en plein champ.

Nous raisonnerons tout au long de notre étude sur un Mobilab de taille moyenne, ce dernier sera aménagé dans un container dont les dimensions sont regroupées dans le tableau ci-dessous:

Tableau 6: Caractéristiques du Container moyen [47]

Container 30' pieds		
	Dimensions Intérieures	Longueur 9.00 m
		Largeur 2.30 m
		Hauteur 2.40 m
	Ouverture de Portes	Largeur 2.286 m
		Hauteur 2.278 m
	Poids du Tare	2492 kg
	Capacité du volume	49.68 m ³
Capacité du chargement	24 749 kg	

Chapite 1:
Unité d'extraction mixte
par entrainement à la vapeur
et par solvants volatils

Unité d'extraction mixte par entrainement à la vapeur et par solvants volatils

Pour cette unité, notre Mobilab contiendra :

- Une chaudière ;
- Un silo ;
- Des caissons mobiles (extracteurs) ;
- Deux aérocondenseurs ;
- Des décanteurs ;
- Une installation photovoltaïque ;
- Des Pompes ;
- Une citerne d'eau de 300 litres;
- Une citerne d'Hexane de 600 litres.

De plus, nous aurons 2 échelles, 1 porte, 3 issues de secours et 3 extincteurs, 2 récipients pour les huiles, une armoire contenant les flacons d'huiles essentielles, 2 ventilateurs de plafond pour une bonne aération, des vannes, des débits mètres, des soupapes de sécurité et des indicateurs de niveau pour contrôler le débit et éviter toute surpression.

I. Unité d'extraction d'huiles essentielles par entrainement à la vapeur d'eau :

Le dimensionnement de cette unité a déjà été établi dans un projet de fin d'études intitulé « Potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans une unité d'extraction d'huiles essentielles mobile » fait par E-H.BENYOUSSEF et ses collaborateurs 2009, E.N.P, Alger, Algérie.

Le procédé d'extraction de cette unité consiste à brûler une quantité de biomasse dans la cheminée. L'énergie produite sert à élever la température de l'eau dans le ballon (alimenté en continu par la citerne) jusqu'à sa vaporisation. La vapeur d'eau passe dans des extracteurs chargés de matière végétale pour en extraire l'huile essentielle. Cette huile est récupérée par décantation après condensation du mélange huile essentielle/vapeur d'eau dans un serpentin à l'aide d'un aérocondenseur. L'eau de décantation est ensuite réinjectée dans le ballon pour une récupération maximale d'huile essentielle, ce que l'on appelle le cohobage.

L'unité travaille 8 heures par jour en réalisant deux manipulations de 4 heures chacune. À la fin de chaque manipulation, on charge les extracteurs de matière végétale fraîche, la précédente est mise à sécher et servira comme biomasse pour une nouvelle manipulation

Dans ce qui suit, nous donnons un récapitulatif du dimensionnement de l'unité ainsi que son bilan énergétique :

Tableau 7: Débits de matière du Mobilab moyen [47]

Matière végétale à traiter (kg/jr)	800
Débit de vapeur (Kg/jr)	800
Biomasse à bruler (kg/jr)	400

I.1. Contribution de la biomasse au recouvrement des besoins de production de vapeur d'eau

Le tableau qui suit donne le rapport entre l'apport de la biomasse et les besoins énergétiques pour la production de différents débits de vapeur d'eau :

Tableau 8 : Contribution de la biomasse au recouvrement des besoins de production de vapeur d'eau [47]

Débit de biomasse	Débit de Vapeur (Kg/h)	Besoin énergétique KW	Capacité biomasse KW	Capacité biomasse avec perte de chaleur	Rapport entre l'apport de la biomasse et les besoins énergétiques
100 Kg/h	25	20	469	328.3	16.48
	50	40			8.24
	100	80			4.12
	200	160			2.06
	400	320			1.03

De ce tableau on peut conclure que la biomasse recouvre largement nos besoins énergétiques (4 fois plus pour un débit de vapeur de 100 Kg/h).

I.2. Caractéristiques de la cheminée

La cheminée se compose de trois parties différentes, ce tableau donne les dimensions de chacune :

Tableau 9: Caractéristiques de la cheminée [47]

	Dimensions (m)		Nature du matériau	Poids (Kg)
Foyer	Hauteur	0.9	Brique réfractaire	308
	Profondeur	0.7		
	Longueur	1.2		
Avaloir	Hauteur	0.6	Brique réfractaire	180
	Profondeur	0.7		
	Longueur	1.2		
Conduit de fumées	Hauteur	1.27	Acier inoxydable	16
	Profondeur	0.7		

	Longueur	0.6	
--	----------	-----	--

I.3. Circuit de vapeur dans la cheminée

Pour assurer la production de vapeur, un ballon d'eau chaude de 15 L (0.3m de diamètre) sera placé à l'intérieur de la cheminée plus exactement à 0.9 m de la base du foyer, posé sur une grille en tôle qui résistera à la température du four.

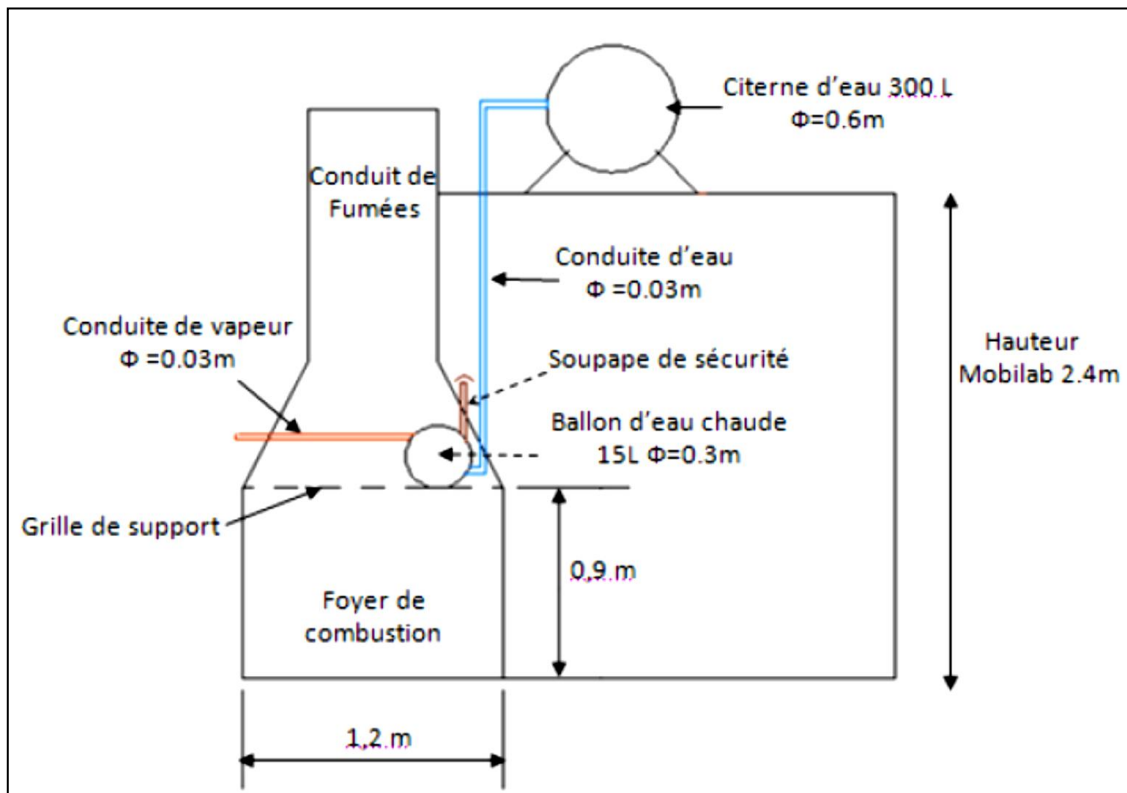


Figure 22: Circuit de vapeur dans la cheminée [47]

I.4. Caractéristiques des extracteurs

Au lieu d'utiliser un extracteur d'huiles essentielles classique, on utilisera une nouvelle technologie, à savoir la technologie des caissons mobiles.

À l'intérieur de ces caissons, nous mettrons la matière végétale à traiter, puis, à l'aide de conduites se trouvant sur les deux côtés des caissons, nous ferons passer la vapeur d'eau.

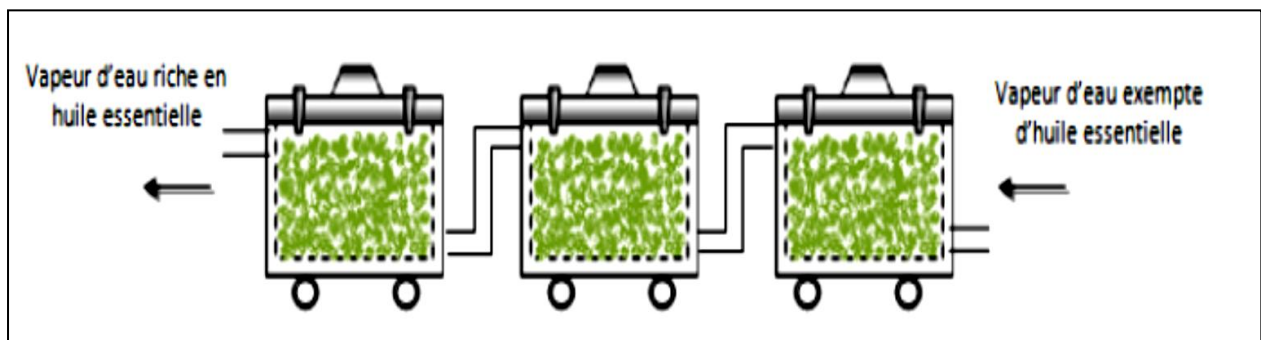


Figure 23: Schematisation des extracteurs [47]

Le tableau suivant donne les dimensions des caissons mobiles :

Tableau 10: Dimensions du caisson mobile [47]

Hauteur	1.0 m
Largeur	0.6 m
Longueur	1.0 m
Capacité	100 kg
Volume	0.6 m ³

Le tableau qui suit donne le nombre des caissons :

Tableau 11: Nombre des caissons mobiles [47]

Biomasse à traiter Kg/jour	Biomasse à traiter Kg/manipulation	Nombre de caissons nécessaires	Nombre de caissons dans le Mobilab
800	400	4	6

I.5. Dimensionnement de l'aérocondenseur

Simulé par le logiciel Hysys, pour un débit de vapeur de 100 Kg/h (800 Kg/jour pendant 8 heures de manipulation).

Tableau 12: Dimensionnement du serpentin et de l'aérocondenseur [47]

Débit d'air (m ³ /h)	20 000	Longueur totale du serpentin	28.6
Nombre de ventilateurs	8	Nombre de rangées n	16
Overall UA (KJ/h.K)	11 081.83	Diamètre interne d (m)	0.2
Surface d'échange A' (m ²)	2.84	Longueur du tube l (m)	1.4

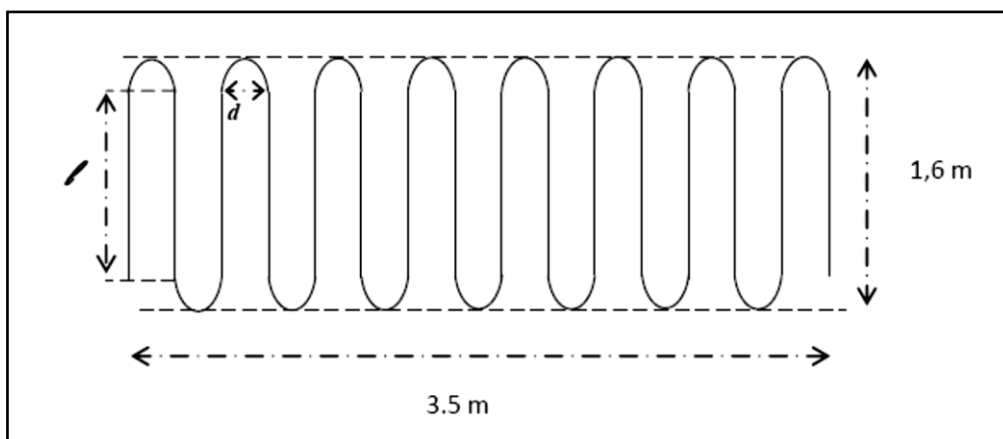


Figure 24: Schéma représentatif du serpentin [47]

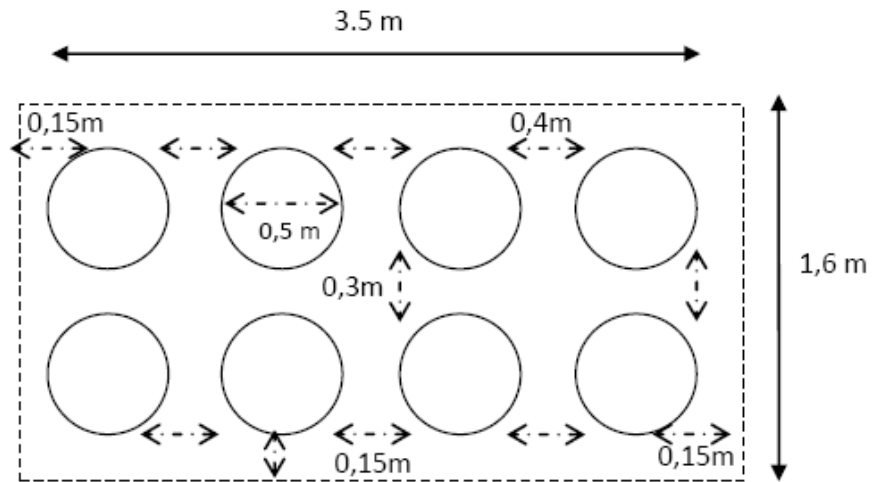


Figure 25: Disposition des ventilateurs de l'aérocondenseur [47]

I.6. Dimensionnement du décanteur

À sa sortie du condenseur, le mélange huile-eau sera récolté dans le décanteur, qui a pour but de séparer l'huile essentielle de l'hydrolat qui sera réinjecté par cohobage dans le ballon de la cheminée.

Tableau 13: Dimensions du décanteur [47]

Volume (m ³)	0.02
Hauteur totale (m)	0.30
H ₁ (m)	0.10
H ₂ (m)	0.20
Diamètre <i>d'</i> (m)	0.32
Diamètre <i>D'</i> (m)	0.53

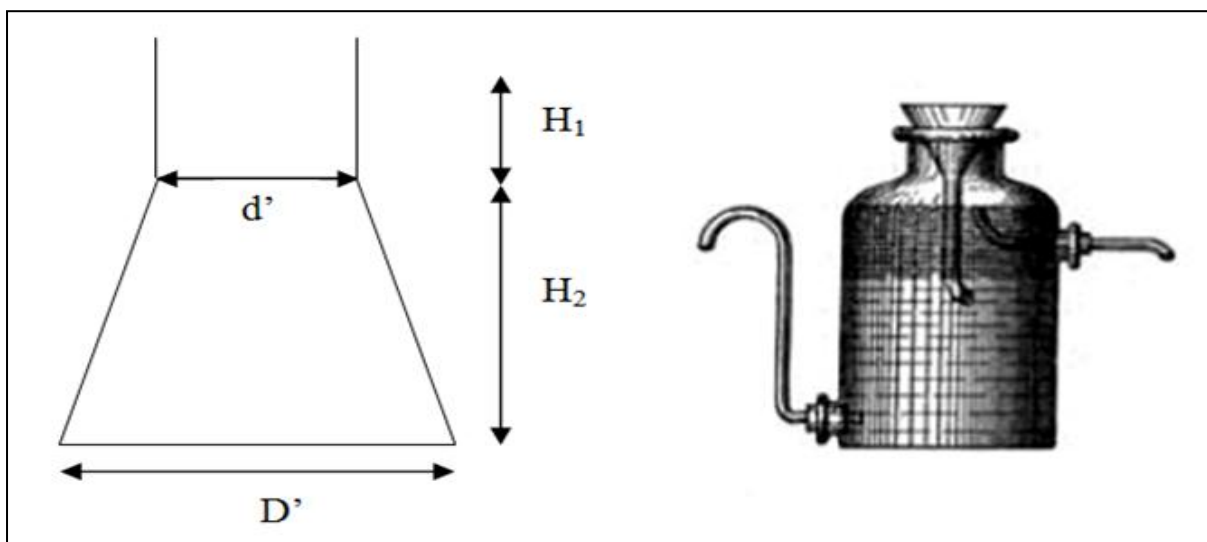


Figure 26: Vase florentin [47]

I.7. Dimensionnement de la pompe

À la sortie du décanteur, la phase aqueuse est réinjectée, à l'aide d'une pompe, dans la chaudière (simulée par le logiciel Hysys).

Tableau 14: Dimensions de la pompe [47]

Hauteur de refoulement (m)	1
Efficacité (%)	90
Pression atteinte (kPa)	11
Puissance (W)	50
Capacité (m ³ /h)	0.10034

I.8. Dimensionnement des panneaux solaires

Dimensionnés par le logiciel Tecsol :

Tableau 15: Quantification de la consommation électrique [47]

Nombre de ventilateurs	8
Puissance d'un ventilateur (W)	60
Quantité d'électricité nécessaire par jour (Wh/jr)	3840
Puissance d'un ventilateur de plafond (W)	40
Quantité d'électricité nécessaire par jour (Wh/jr)	320
Puissance de la pompe (W)	50
Quantité d'électricité nécessaire par jour (Wh/jr)	400
Quantité d'électricité totale nécessaire par jour (Wh/jr)	4560

Tableau 16: Caractéristiques des panneaux solaires [47]

Production électrique (Wh)	4760
Nombre total des modules	30
Surface approximatives des modules (m ²)	15
Intensité maximum de charge (A)	43.75

II. Unité d'extraction par solvant volatil (hexane)

Dans ce qui suit, nous avons tenté d'apporter une amélioration de l'unité décrite précédemment par l'introduction d'un module d'extraction par solvant et régénération du solvant moyennant les équipements déjà installés.

En effet le procédé d'extraction par solvant offre non seulement la possibilité de produire des concrètes des plantes aromatiques, mais aussi intervient dans la production des huiles végétales, objet de notre travail.

Cette unité travaille avec les caractéristiques suivantes :

- On fixe le temps d'une manipulation à 4h et on effectuera 2 manipulations par jour.
- On fixe le temps d'extraction à 3h
- On suppose que le miscella contienne une faible quantité d'extrait c'est pour cela que nous assimilons le mélange hexane/extrait à de l'hexane pur.
- On utilisera 3 caissons mobiles d'une capacité de 0.1 m³ chacun pour l'extraction à l'hexane.
- On utilisera un caisson mobile de réserve d'une capacité de 0.6 m³.

II.1. Étapes du procédé d'extraction

Pour la réalisation de cette extraction, nous procédons comme suit :

- La manipulation commence par l'alimentation des caissons chargés de matière végétale par l'hexane;
- Après 3h, les caissons seront pleins, on arrête l'alimentation ;
- On effectue la vidange des caissons, l'hexane est envoyé vers le caisson de réserve qui a une capacité de 600l. Puis, on procède à la désolvatation de la matière végétale en envoyant un débit de vapeur d'eau de 100kg/h pour une durée de 10 minutes. À la sortie des caissons, la vapeur est condensée dans un serpentin. Après décantation, l'hexane récupéré est renvoyé vers le caisson de réserve.
- Une pompe de capacité de 300l/h est utilisée pour envoyer l'hexane du caisson de réserve vers le ballon où il subit une distillation flash, c'est-à-dire que nous vaporisons 95% du débit d'hexane et les 5% restants sont récupérés à la fin de chaque manipulation à l'aide du robinet de vidange du ballon de vaporisation.
- La matière végétale est déchargée et mise à sécher pour servir de biomasse. Une nouvelle matière végétale est mise en place dans les caissons pour effectuer une nouvelle manipulation.

II.2. Détermination du débit volumique de l'hexane dans les caissons

$$t_{manip} = \frac{3 * V_{caisson}}{\dot{v}_{hexane}} \Rightarrow \dot{v}_{hexane} = \frac{3 * V_{caisson}}{t_{manip}}$$

Application numérique :

$$\dot{v}_{hexane} = \frac{3 * 0.1}{3} = 0.1 \text{ m}^3/\text{h}$$

II.3. Bilan énergétique

La température d'ébullition de l'hexane est de 69°C à pression atmosphérique.

Nous raisonnons pour 1Kg d'hexane :

- **Passage de l'hexane de 20°C à 69°C :**

$$\Delta H_1 = \int_{293}^{342} C_{p_{liq}} dT$$

La chaleur spécifique de l'hexane liquide est :

$$C_{p_{liq}} = C_1 + C_2 * T + C_3 * T^2 \text{ (J/Kmol.K) [40]}$$

$$C_1 = 1,7212 * 10^5$$

Application numérique :

$$\Delta H_1 = \left[C_1 * T + \frac{C_2}{2} * T^2 + \frac{C_3}{3} * T^3 \right]_{293}^{342} = 9966368 \text{ J/Kmol}$$

$$\Delta H_1 = 115,888 \text{ KJ/Kg}$$

- **Chaleur de vaporisation de l'hexane :**

$$\Delta H_2 = C_1 * (1 - T_r)^{C_2} \quad (\text{Donnée en J/Kmol}) \text{ [40]}$$

$$C_1 = 4,4544 * 10^7; = 0,39002. \quad [40]$$

$$T_c = 507,6 \text{ K} ; T_r = \frac{T_{\text{ébullition}}}{T_c}$$

Application numérique :

$$\Delta H_2 = 28777922 \text{ J/Kmol}$$

$$\Delta H_2 = 334,627 \text{ KJ/Kg}$$

Pour éviter les pertes de chaleur, nous dépasserons la température d'ébullition jusqu'à atteindre 72°C.

- **Passage de l'hexane de 69°C à 72°C :**

$$\Delta H_3 = \int_{342}^{345} C_{p_{vap}} dT$$

$$C_{p_{vap}} = C_1 + C_2 * \left[\frac{C_3/T}{\sinh(C_3/T)} \right]^2 + C_4 * \left[\frac{C_5/T}{\cosh(C_5/T)} \right]^2 \quad (\text{J/Kmol.K}) [40]$$

$$C_1 = 1,0440 * 10^5 ; C_2 = 3,5230 * 10^5 ; C_3 = 1,6946 * 10^3 ;$$

$$C_4 = 2,3690 * 10^5 ; C_5 = 761,6. \quad [40]$$

Le calcul de l'intégrale se fait à l'aide d'une calculatrice graphique qui nous donne le résultat:

$$\Delta H_3 = 480454 \text{ J/Kmol}$$

$$\Delta H_3 = 5,57 \text{ KJ/Kg}$$

Donc, la chaleur totale nécessaire pour le passage de l'hexane de 20°C à 72°C est de :

$$Q_T = 456,085 \text{ kJ/Kg} = 0.126 \text{ kWh/Kg}$$

Le tableau suivant donne le rapport entre l'apport de la biomasse et les besoins énergétiques pour différents débits d'hexane:

Tableau 17: Recouvrement du besoin énergétique de la vaporisation des débits massiques d'hexane par la biomasse

Débit de biomasse (Kg/h)	Débit massique d'hexane (Kg/h)	Besoin énergétique KW	Capacité biomasse KW	Capacité biomasse avec pertes de chaleur KW	Rapport entre l'apport de la biomasse et les besoins énergétiques
10 Kg/h	50	6.35	46.9	32.8	5,17
	150	19.05			1,72
	300	38.1			0,86
	450	57.15			0,57
	600	76.2			0,43
	750	95.25			0,34
20 Kg/h	50	6.35	93.8	65.6	10,33
	150	19.05			3,44
	300	38.1			1,72
	450	57.15			1,15
	600	76.2			0,86
	750	95.25			0,69
40 Kg/h	50	6.35	187.6	131.2	20,66
	150	19.05			6,89
	300	38.1			3,44
	450	57.15			2,30
	600	76.2			1,72
	750	95.25			1,38
80 Kg/h	50	6.35	375.2	262.4	41,32
	150	19.05			13,77
	300	38.1			6,89
	450	57.15			4,59
	600	76.2			3,44
	750	95.25			2,75
120 Kg/h	50	6.35	562.8	393.6	61,98
	150	19.05			20,66
	300	38.1			10,33
	450	57.15			6,89
	600	76.2			5,17
	750	95.25			4,13
240 Kg/h	50	6.35	1125.6	787.2	123,97
	150	19.05			41,32
	300	38.1			20,66
	450	57.15			13,77
	600	76.2			10,33
	750	95.25			8,26

II.4. Quantité de biomasse nécessaire par manipulation

Notre unité travaille avec un débit d'hexane de 100 l/h pendant 3 heures, à la fin de la vidange des trois caissons, l'hexane occupera le volume de 300 l dans le caisson de réserve.

Sachant que la chaleur totale nécessaire pour le passage d'un kilogramme d'hexane de 20°C à 72°C est de 0.126 kWh, la quantité de chaleur nécessaire à la vaporisation de tout le volume d'hexane est de :

$$Q_{\text{biomasse}} = 0.126 * 300 * 0.66 = 25 \text{ kWh}$$

1 Kg de biomasse fournit 4.69 kWh, en comptant 30% de pertes en chaleur, 1 Kg de biomasse fournit 3.28 kWh. La quantité de biomasse nécessaire est donc :

$$\dot{m}_{\text{biomasse}} = 25/3.28 = 7.6 \text{ Kg}$$

En réalité, nous ne vaporisons que 95% de ce débit, pour cela nous devons brûler 7.3 Kg/h de biomasse.

De plus la matière végétale doit subir une désolvatation après chaque manipulation car, en moyenne, celle-ci contiendra 20 à 30 % d'hexane, pour cela nous devons faire passer un courant de vapeur d'eau dans les caissons à raison de 100 Kg/h et ceci durant 10 mn.

On sait que l'énergie nécessaire pour produire 100 Kg/h de vapeur d'eau est de 80kWh, ce qui correspond à une quantité de biomasse à brûler de 24.4 kg/h donc pour 10 mn nous avons besoin de 4 kg de biomasse.

La quantité de biomasse totale nécessaire pour chaque manipulation est de 11.3 Kg.

II.5. Capacité du caisson mobile

Pour déterminer la capacité d'un caisson mobile, nous devons passer par le calcul de la masse volumique de la biomasse. Celle-ci dépend du type de la matière végétale, de son tassement et de son humidité. Le tableau qui suit donne la masse volumique de différentes matières végétales en tenant compte du taux de leur humidité :

Tableau 18: Masse volumique de certaines plantes [35]

Matière végétale	Taux d'humidité	Masse volumique (Kg/m ³)
Basilic	63 – 75 %	150 – 200
Géranium	80 – 85 %	150 – 200
Lavande	65 – 72 %	100 – 150
Menthe	60 – 40 %	100 – 150
Sauge	60 – 75 %	80 – 120
Coriandre	12 – 14 %	300 - 350

Avec les données du tableau précédent, nous pouvons calculer une masse volumique moyenne de la matière végétale, on trouve qu'elle est égale à 170 kg/m^3 . Le caisson possède un volume de 0.1 m^3 donc il peut contenir 17 kg de matière végétale. Cela nous donne 51 Kg de matière végétale par manipulation.

II.6. Temps de vaporisation et temps de séjour de l'hexane dans le ballon

Nous disposons d'un ballon d'une capacité de 20 litres , celui-ci est rempli au $\frac{3}{4}$, soit 15 litres d'hexane :

$$Q_{\text{biomasse}} = \frac{M_{\text{hexane}}}{t} * Q_T \Rightarrow t = M_{\text{hexane}} * \frac{Q_T}{Q_{\text{biomasse}}}$$

Application numérique :

$$t = 0.95 * 15 * 0.66 * \frac{0.126}{25} * 3600 = 170 \text{ s}$$

Ce qui nous donne un temps de vaporisation de **2 minutes et 50 secondes**.

Le temps de séjour est donné par :

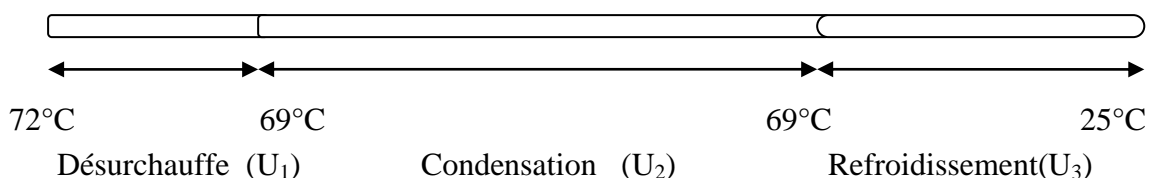
$$t_{\text{séjour}} = \frac{V_{\text{ballon}}}{\dot{v}_{\text{hexane}}} = \frac{15}{300} * 3600 = 180 \text{ s} \Rightarrow t_{\text{séjour}} = \mathbf{3 \text{ minutes}}$$

Donc le ballon est suffisant pour l'évaporation de l'hexane.

II.7. L'aérocondenseur

Le calcul qui suit vise à estimer la surface d'échange nécessaire à la condensation des vapeurs d'hexane et la comparer avec celle déjà calculée dans le cas de l'unité d'extraction par entrainement à la vapeur d'eau.

La comparaison s'effectue entre la surface d'échange nécessaire à la condensation d'un débit de vapeur d'hexane de 188.1 kg/h de 72°C à 25°C et celle d'un débit de 100 kg/jr (12.5 kg/h) de vapeur d'eau de 110°C à 25°C en convection naturelle.



$(1/U_i) = (1/h_{\text{air}}) + (1/h_i)$ tel que : $i = 1, 2, 3$.

U_i : coefficient d'échange de chaleur.

$h_{\text{air}} = 18 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}$

h_i : coefficient de convection de la vapeur d'hexane/ l'hexane liquide dans le tube.

$$A_{\text{totale}} = A_1 + A_2 + A_3$$

- **La partie désurchauffe :**

C'est le passage de la vapeur de 72°C à 69°C . Sa surface d'échange $A_1 = Q_1 / U_1 \times \text{DTLM}_1$, avec $Q_1 = 0,3 \text{ KWh}$. Elle est négligeable devant la surface d'échange totale.

- **La partie condensation :**

C'est le changement d'état qui s'effectue à 69°C .Sa surface d'échange :

$A_2 = Q_2 / U_2 \times \text{DTLM}_2$, avec $Q_2 = 18.4 \text{ KW}$. (Pour un débit de 188.1 kg/h d'hexane)

$\text{DTLM}_2 = T_2 - T_{\text{air}} = 69 - 20 = 49 \text{ }^\circ\text{C}$.

$(1/U_2) = (1/h_{\text{air}}) + (1/h_2)$

$$\frac{hD}{\lambda_1} = 0,026 \text{Pr}_1^{1/3} \left\{ \frac{D}{\mu_1} \left[\dot{G}_g \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{1/2} + \dot{G}_l \right] \right\}^{0,8} \quad [41]$$

On remarque que le coefficient de transfert de chaleur h change tout au long de la condensation puisqu'il est en fonction des flux massiques de la vapeur et du liquide qui varient tout au long de la condensation. On travaille à une température de 69°C et à pression atmosphérique, on considère la vapeur d'hexane comme étant un gaz parfait.

$$D = 0,03 \text{ m}, \quad \lambda_1 = 0,113 \text{ W/m.K}, \quad \rho_l = 613 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \quad \mu_l = 2,08 \cdot 10^{-4} \text{ Pa.s}$$

$$\rho_g = \frac{m_g}{V_g} = \frac{n M}{V_g} = M \frac{P}{RT} = 0,086 \frac{101325}{8,314 * 342} = 3,06 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{G} = \frac{\dot{m}}{S} = \frac{\dot{m}}{\pi r^2}$$

On prend une valeur moyenne de h_2 entre le début et la fin de la condensation.

Au début de la condensation :

$$\dot{m}_g = 188 \text{ kg/h}, \quad r = 0,015 \text{ m} \Rightarrow \dot{G}_g = \frac{188}{\pi 0,015^2 3600} = 73,88 \text{ kg/s.m}^2$$

$$\dot{m}_l = 0$$

Application numérique :

$$\frac{h_{2_1} 0,03}{0,113} = 0,026 \text{Pr}_1^{1/3} \left\{ \frac{0,03}{2,08 \cdot 10^{-4}} \left[73,88 \left(\frac{613}{3,06} \right)^{1/2} + 0 \right] \right\}^{0,8}$$

$$\Rightarrow h_{2_1} = 2218,36 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

À la fin de la condensation :

$$\dot{m}_l = 188 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \Rightarrow \dot{G}_l = 73,88 \frac{\text{kg}}{\text{s.m}^2}$$

$$\dot{m}_g = 0$$

Application numérique :

$$\frac{h_{2_2} 0,03}{0,113} = 0,026 \text{Pr}_1^{1/3} \left\{ \frac{0,03}{2,08 \cdot 10^{-4}} \left[0 * \left(\frac{613}{3,13} \right)^{1/2} + 73,88 \right] \right\}^{0,8}$$

$$\Rightarrow h_{2_2} = 266,27 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

On prend la moyenne:

$$h_2 = \frac{h_{2_1} + h_{2_2}}{2} = \frac{2218,36 + 266,27}{2} = 1242.3 \text{ W/ m}^2\text{K}$$

$$h_2 = 4472.28 \text{ kJ / h. m}^2. \text{K}$$

Le coefficient d'échange de chaleur global :

$$\frac{1}{U_2} = \frac{1}{h_{\text{air}}} + \frac{1}{h_2} \Rightarrow \frac{1}{U_2} = \frac{1}{18} + \frac{1}{4472.28} \Rightarrow U_2 = 17.92 \text{ kJ / h. m}^2. \text{K}$$

La surface d'échange :

$$A_2 = \frac{Q_2}{U_2 * DTLM_2} = \frac{62909.876}{17.92 * 49} = 71.64 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 71.64 \text{ m}^2$$

- **La partie refroidissement :**

C'est le passage de l'hexane de 69°C à 25°C.

Sa surface d'échange est : $A_3 = Q_3 / U_3 * DTLM_3$,

Avec $Q_3 = 5.45 \text{ KW}$ (pour un débit de 188.1 kg/h d'hexane).

$DTLM_3 = [(69-20) - (25-20)] / \ln [(69-20) / (25-20)] = 19, 27$.

$(1/U_3) = (1/h_{\text{air}}) + (1/h_3)$

On a que $h_3 * D / \lambda = 0.125 Y^{(1/3)}$ [40]

Avec $Y = Pr_1 * Gr = 262243187$ donc $10^7 < Y < 10^{12}$ [40]

$\Rightarrow h_3 = 1090.8 \text{ KJ/h.m}^2. \text{K} \Rightarrow U_3 = 17.70 \text{ kJ / h. m}^2. \text{K}$

La surface d'échange est :

$$A_3 = 63.85 \text{ m}^2$$

La surface d'échange totale entre désurchauffe, condensation et refroidissement est de :

$$A_{\text{totale}} = 135.5 \text{ m}^2$$

Tableau 19: Comparaison de la surface d'échange

Composé	Hexane	Eau
Débit	188 kg/h	12.5 kg/h
Surface totale en convection naturelle	135.5 m ²	244.15 m ²

Donc la surface nécessaire à la condensation de l'hexane est inférieure à celle utilisée pour l'eau, pour un débit massique d'hexane 15 fois supérieur à celui de l'eau.

À partir de là, nous pouvons déduire que l'échangeur de chaleur dimensionné en convection forcée pour la condensation de l'eau suffit largement pour la condensation de l'hexane. Nous utiliserons donc le même serpentin que nous placerons en parallèle à celui du circuit entraînement à la vapeur d'eau.

II.8. Quantité de biomasse résiduelle de l'unité d'extraction par l'hexane

La moitié de la matière végétale traitée peut être utilisée comme biomasse ce qui représente 25.5 kg/manip or nous n'en utilisons que 12 kg/manip. Ce qui nous laisse une quantité de biomasse non valorisée de 13.5 kg/manip. Ceci représente 26% de la matière végétale traitée.

Tableau 20: Quantité de biomasse non valorisée

Quantité de biomasse pouvant être valorisée / manip	25.5 Kg
Quantité de biomasse nécessaire / manip	12 Kg
Quantité de matière végétale non valorisée / manip	13.5 Kg
Quantité de matière végétale non valorisée / jour	27 Kg
Quantité de matière végétale non valorisée / an	9666 Kg

La matière végétale non utilisée comme biomasse représente plus de 14% de la matière végétale traitée. En équivalence énergétique, ceci représente 31 705 kWh/an. Cette énergie pourrait être valorisée pour produire du travail. Ce qui nous mène à concevoir une unité d'extraction d'huile végétale par pression en introduisant un moteur thermique.

Chapitre 2:

Unité d'extraction de l'huile d'olive

I. Introduction

Jusqu'à présent nous avons vu que la biomasse est un vecteur intéressant pour la production de chaleur, nous allons étudier dans ce qui suit sa capacité à produire de l'énergie mécanique.

Nous introduisons une unité d'extraction d'huile d'olive dans notre Mobilab, en intégrant de nouveaux équipements : une presse, une turbine à gaz, un échangeur de chaleur.

Notre choix s'est porté sur une unité d'extraction d'huile d'olive du fait que l'on trouve des plantations d'olives dans différentes régions d'Algérie, où la production de huile se fait de façon traditionnelle.

Notre choix s'est porté sur une turbine à gaz pour la production du travail mécanique du fait de ses avantages par rapport à d'autres moteurs thermiques, le tableau ci-dessous nous donne les caractéristiques de différents moteurs thermiques :

Tableau 21: Caractéristiques de quelques moteurs thermiques [10]

Moteur	Combustible	Rendement	Pollution	Disponibilité	Temps de démarrage	Taille
Diesel	Gazole	40 %	Très polluant	Disponible	Quelques secondes	Petite
Machine à vapeur	Tout type	10 %	Selon le type de combustible	Plus sur le marché	Plusieurs heures	Grande
Turbine à vapeur	Tout type	10 – 90 %	Selon le type de combustible	Disponible	Plusieurs heures	Toute taille (Selon la puissance)
Turbine à gaz à combustion externe	Tout type	25 – 90 %	Selon le type de combustible	De plus en plus disponible	Quelques minutes	Toute taille (Selon la puissance)

II. Étapes du procédé

Avant de procéder à leur expression, les olives doivent être lavées et tamisées pour enlever les feuilles et toute particule de terre et de pierre. Par la suite, elles subissent les étapes suivantes :

- Les olives sont introduites dans la presse qui a une capacité de 200 kg/h, l'huile brute est récupérée ;
- Les grignons d'olives (résidu d'extraction) représentent 40% de la masse globale traitée et ont une teneur en gras d'environ 3-7 %, ils peuvent être destinés soit à une extraction d'huile résiduelle par le procédé d'extraction à l'hexane ou bien être utilisés comme biomasse ;

Notre unité d'extraction d'huile d'olive a une durée de travail de 4 h/jour et utilise la biomasse comme combustible.

III. Dimensionnement de l'unité

III.1. Dimensionnement de la microturbine à gaz à combustion externe

L'air (fluide moteur) est comprimé dans le compresseur puis réchauffé dans un échangeur de chaleur avant d'entrer dans la turbine pour se détendre et fournir ainsi le travail mécanique nécessaire au fonctionnement du compresseur et de la presse. L'air détendu en sortie de turbine ayant une température élevée sera réinjecté dans le foyer de la cheminée, d'où l'intérêt de ce cycle. En effet, l'air préchauffé servira de comburant et aura un effet positif sur la combustion de la biomasse, les températures des gaz d'échappement seront plus élevées, ceci représente un gain en terme d'énergie.

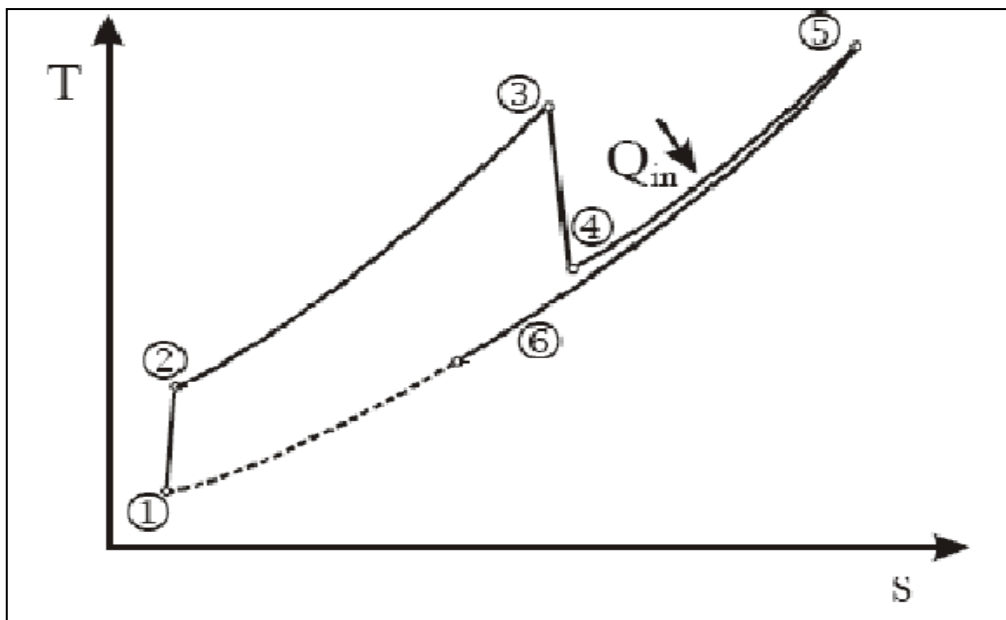


Figure 27: Cycle thermodynamique de l'air [21]

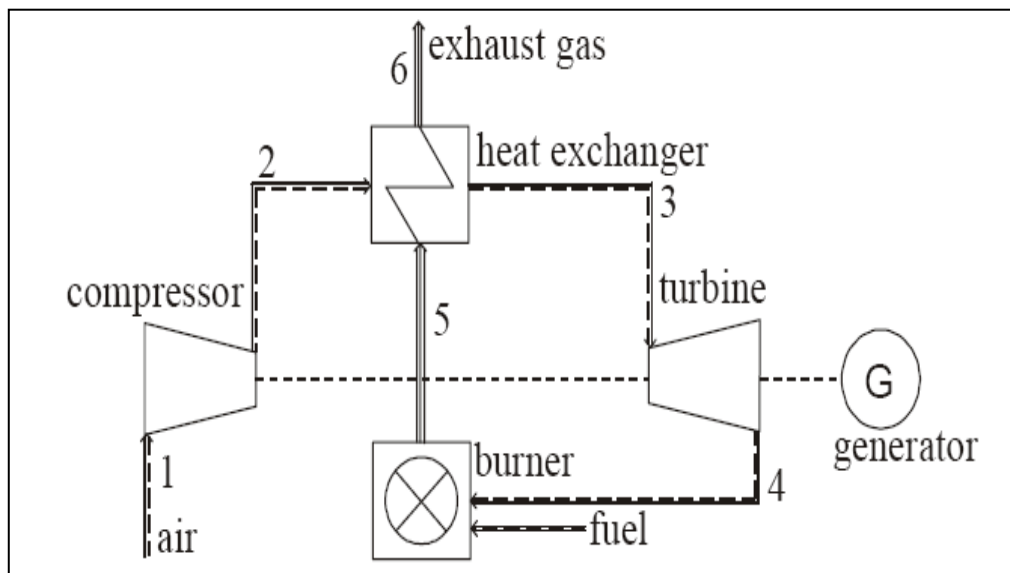


Figure 28: Schéma représentatif de l'installation [21]

Étant donné la grande dilution des gaz brûlés dans l'air en excès et dans l'azote, nous pouvons, en première approximation, ne pas tenir compte des modifications chimiques et assimiler les gaz d'échappement à de l'air [42].

Nous allons déterminer au cours de cette partie les températures du cycle de la microturbine. Pour ce faire, nous allons tout d'abord fixer certains paramètres en se basant sur les normes usuelles dans ce genre d'installation.

Nous fixons donc :

- La température et la pression d'entrée du compresseur :

$$T_1 = 20 \text{ °C} = 293 \text{ K} \quad P_1 = 1 \text{ atm} \approx 1 \text{ bar}$$

- Le rapport de compressibilité : 4.5. Nous négligeons les pertes de charges dans les différents éléments du circuit parcouru par l'air nous aurons donc :

$$\frac{P_2}{P_1} = 4.5 \quad \Rightarrow P_2 = 4.5 \text{ bar}$$

- La température d'entrée de la turbine :

$$T_3 = 950 \text{ °C} = 1223 \text{ K}$$

- Nous supposons que l'échauffement de l'air dans l'échangeur de chaleur est isobare :

$$P_3 = P_2 = 4.5 \text{ bar}$$

- Nous négligeons les pertes de charges dans les différents éléments du circuit parcouru par l'air nous aurons donc :

$$\frac{P_3}{P_4} = \frac{P_2}{P_1} = 4.5 \quad \Rightarrow P_4 = 1 \text{ bar}$$

- Le rendement isentropique du compresseur référence:

$$\eta_c = 0.8$$

- Le rendement isentropique de la turbine :

$$\eta_T = 0.85$$

- La puissance nette de la turbine :

$$p_{net} = 20 \text{ kW}$$

Le choix de 20 KW est dû au fait que le domaine des microturbines commence à partir de 20 KW d'une part, et d'autre part nous n'avons pas besoin d'une très grande puissance car la presse que nous utilisons consomme 7.5 KW.

- **Calcul des températures T_2 , T_4 , du cycle :**

- *** T_2 : Température de l'air à la sortie du compresseur**

Théoriquement, la compression est adiabatique :

$$(T_1)^\gamma * (P_1)^{1-\gamma} = (T_2)^\gamma * (P_2)^{1-\gamma} \Rightarrow T_2 = T_1 * \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad \gamma = 1.4 \quad [42]$$

Application numérique :

$$T_{2th} = 293 * \left(\frac{4.5}{1}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 450 \text{ K}$$

En prenant en considération le rendement isentropique du compresseur :

$$\eta_c = \frac{T_{2th} - T_1}{T_2 - T_1} \Rightarrow T_2 = T_1 + \frac{T_{2th} - T_1}{\eta_c} \quad [42]$$

Application numérique :

$$T_2 = 293 + \frac{450 - 293}{0.8} \Rightarrow T_2 = \mathbf{490 \text{ K}}$$

- *** T_4 : Température de l'air à la sortie de la turbine**

Théoriquement, la détente est adiabatique :

$$(T_3)^\gamma * (P_3)^{1-\gamma} = (T_4)^\gamma * (P_4)^{1-\gamma} \Rightarrow T_4 = T_3 * \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad [42]$$

Application numérique :

$$T_{4th} = 1223 * \left(\frac{1}{4.5}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 796 \text{ K}$$

En prenant en considération le rendement isentropique de la turbine :

$$\eta_T = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4th}} \Rightarrow T_4 = T_3 - \eta_T * (T_3 - T_{4th}) \quad [42]$$

Application numérique :

$$T_4 = 1223 - 0.85 * (1223 - 796) \Rightarrow T_4 = \mathbf{860 \text{ K}}$$

- **Calcul du travail du cycle :**

- Le travail mécanique absorbé par le compresseur :

$$\omega_c = C_p(T_2 - T_1) \quad [42]$$

$$\omega_c = 1.005 (490 - 293) = \mathbf{198 \text{ kJ/kg}}$$

- Le travail fourni par la turbine :

$$\omega_T = C_p(T_3 - T_4) \quad [42]$$

$$\omega_T = 1.1 (1223 - 860) = \mathbf{400 \text{ kJ/kg}}$$

- Le travail net de la turbine :

$$\omega_{net} = \omega_T - \omega_c$$

$$\omega_{net} = 400 - 198 = \mathbf{202 \text{ kJ/kg}}$$

- **Calcul du débit massique d'air à l'intérieur de la turbine :**

$$\dot{m}_{\text{air}} = \frac{\text{Puissance}_{\text{net}}}{\omega_{\text{net}}} = \frac{20}{202} = 0.099 \text{ kg/s} = 356.44 \text{ kg/h}$$

Nous résumons les caractéristiques techniques de notre turbine dans le tableau suivant :

Tableau 22 : Caractéristiques techniques de la microturbine (20 kW)

Rendement isentropique du compresseur	0.8
Rendement isentropique de la turbine	0.85
Température d'entrée du compresseur	293 K
Température d'entrée de la turbine	1223 K
Température sortie de turbine	860 K
Pression d'entrée du compresseur	1 bar
Pression d'entrée de la turbine	4.5 bar
Puissance nette de sortie de la turbine	20 KW
Débit d'air	356 kg/h
Rendement mécanique de la turbine	25%

La microturbine à gaz que nous avons choisie a les caractéristiques des microturbines que nous trouvons sur le marché et dont les principaux fabricants sont : Capstone Turbine Corporation, Bowman Power Systems, Turbec AB.

Les dimensions de la microturbine sont de même ordre de grandeur qu'une turbine qui fournit 30 KW dont les dimensions sont les suivantes :

Tableau 23: Dimensions du Capstone Model C-30 Microturbines[37]

Dimensions	714*1344*1900 (mm)
Poids	478 kg



Figure 29: Capstone Model C-30 Microturbine [37]

III.2. Dimensionnement de l'échangeur de chaleur

Étant donnée le conduit de fumées démontable, nous avons conçu un échangeur de chaleur qui a les mêmes dimensions. Le conduit de fumée sera remplacé par l'échangeur de chaleur, de telle sorte que les gaz d'échappement (assimilés à de l'air) passent dans des tubes verticaux. L'air comprimé (fluide moteur) quant à lui est introduit dans la partie supérieure de l'échangeur et passe à contre-courant à travers les tubes où il se réchauffe, puis sort par un conduit placé dans la partie inférieure de l'échangeur vers la turbine. Notre échangeur sera donc du type "à faisceau et à calandre" avec une passe coté tube et une passe coté calandre.

- **Puissance thermique fournie à l'échangeur de chaleur :**

$$Q = \dot{m}_{\text{air}} \int_{T_2}^{T_3} C_{p_{\text{air}}} dT \Rightarrow Q = 80.5 \text{ kw}$$

$$C_{p_{\text{air}}} = 0.1996 * T + 938.33 \text{ J/kg}$$

- **Débit de biomasse :**

Pour calculer le débit de biomasse qui fournit à l'échangeur sa puissance thermique, nous devons écrire la réaction de combustion de la biomasse. Or, la biomasse est un mélange de plusieurs composés organiques qui diffèrent en type et en masse d'une biomasse à une autre. Pour ce, nous avons choisi de suivre un modèle pour la composition chimique de la biomasse :

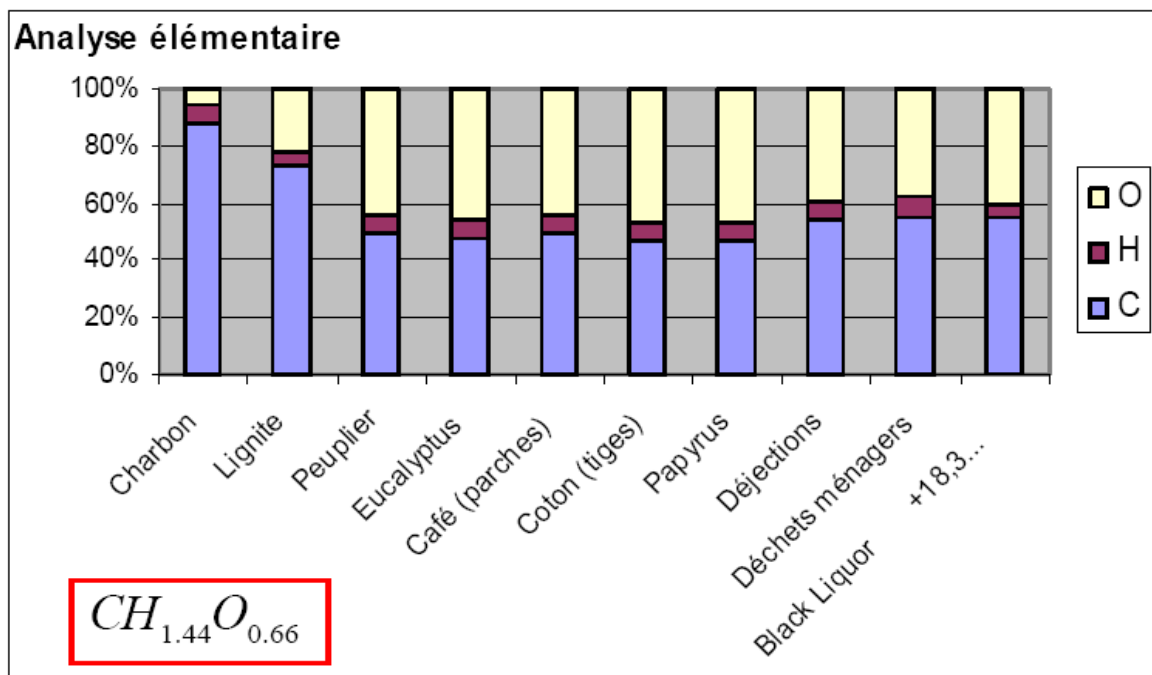
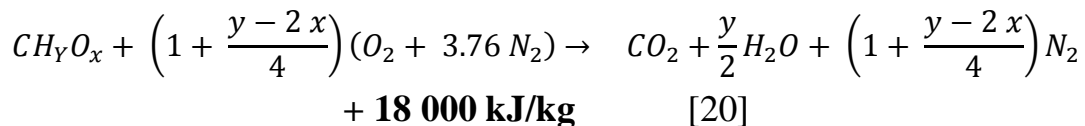
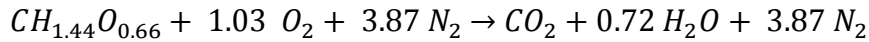


Figure 30: Modélisation de la composition chimique de la biomasse[20]

La biomasse a une composition élémentaire relativement constante. Son pouvoir énergétique inférieur (PCI) est donc peu influencé par sa nature exacte [20].



L'échangeur de chaleur consomme une puissance de 80.5 kW, d'après le modèle que nous avons utilisé, l'énergie libérée lors de la combustion de la biomasse est de 18 000 kJ/kg, on estime que les pertes liées à la combustion sont de 30%, ce qui nous donne 12 600 kJ/kg :

$$\dot{m}_{biomasse} = \frac{80.5}{\left(\frac{12\,600}{3600}\right)} = 23 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_{biomasse} = 23 \text{ kg/h}$$

Donc, le débit de biomasse nécessaire à la production de la puissance de l'échangeur est de 23kg/h.

- **La masse d'air nécessaire pour bruler 1 kg de biomasse dans les conditions stœchiométriques :**

$$M_{biomasse} = M_{CH_{1.44}O_{0.66}} = 12 + 1.44 + 0.66 * 16 = 24 \text{ g/mole}$$

$$n_{biomasse} = \frac{m_{biomasse}}{M_{biomasse}} = \frac{1000}{24} = 41.67 \text{ mole/kg}$$

Selon la réaction chimique de combustion, il nous faut 1.03 moles d'oxygène pour bruler une mole de biomasse, donc :

$$n_{O_2} = 41.67 * 1.03 = 42.92 \text{ moles}$$

Avec :

$$\frac{n_{O_2}}{n_{air}} = 0.21 \Rightarrow n_{air} = \frac{42.92}{0.21} = 204.38 \text{ moles}$$

$$m_{air} = 204.38 * 0.02884 = 5.89 \text{ kg}$$

Donc, pour bruler 1Kg de biomasse, il nous faut 6Kg d'air dans les conditions stœchiométriques.

- **Calcul de la DTLM:**

$$DTLM = \frac{(T_5 - T_3) - (T_6 - T_2)}{\ln \frac{(T_5 - T_3)}{(T_6 - T_2)}}$$

Calcul de T₅: Température d'entrée air chaud dans l'échangeur de chaleur

On suppose que l'énergie thermique fournie par la biomasse est absorbée par l'air :

$$Q = \xi \dot{m}_{air_s} \int_{T_4}^{T_5} C_{p_{air}} dT$$

$$\xi = \frac{\text{Quantité réelle d'air de combustion}}{\text{Quantité d'air de combustion dans les conditions stœchiométriques}}$$

Ce rapport doit être supérieur à 1 sinon il y aurait formation de polluants et d'imbrulés en plus de la diminution de la température de combustion.

Calcul de T₆: Température de sortie air chaud de l'échangeur de chaleur

$$\dot{m}_{air\ chaud} * \int_{T_6}^{T_5} C_{p_{air}} dT = \dot{m}_{air\ froid} \int_{T_2}^{T_3} C_{p_{air}} dT$$

Régime permanent : lorsque nous atteignons le régime permanent, l'air sortant de la turbine est à T₄=860 K, il est réinjecté dans la cheminée comme comburant pour la biomasse, ceci explique les températures élevées T₅ que nous atteignons à l'entrée de l'échangeur de chaleur.

Régime transitoire : au début de la manipulation, nous sommes en régime transitoire, le compresseur est entraîné par un lanceur et les températures T₅ (entrée air chaud échangeur) et T₆ (sortie air chaud échangeur), que nous pouvons atteindre pour une température d'air comburant à l'intérieur de la cheminée de 298 K, sont :

Tableau 24: Températures T₅ et T₆ en régime transitoire pour différents ξ

ξ	T ₅ (K)	T ₆ (K)
1,1	1941,21	575,62
1,2	1820,11	553,04
1,3	1715,86	533,86
1,4	1625,13	517,37
1,5	1545,43	503,03
1,6	1474,85	490,46
1,7	1411,90	479,33
1,8	1355,40	469,43
1,9	1304,39	460,55
2	1258,11	452,54
2,1	1215,92	445,29
2,2	1177,31	438,68
2,3	1141,83	432,65
2,4	1109,12	427,11
2,5	1078,86	422,01

Nous remarquons que le domaine ξ > 1.5 ne peut pas être retenu. Ceci est dû au fait que dans ce domaine, T₆ < T₂ ce qui n'est pas possible.

- **Calcul du nombre de tubes**

La figure représente les dimensions de l'échangeur (60*70*120) cm. Nous utilisons des panneaux sandwich du côté extérieur de la calandre afin de garantir une bonne isolation et donc diminuer les déperditions de chaleur. L'épaisseur de ses panneaux est fixée à 6 cm, ce qui nous donne les dimensions de la calandre de (a = 58* b = 48) cm.

En ce qui est des tubes, nous utilisons les dimensions standards selon la norme TEMA [43]:

- Le diamètre extérieur d'un tube d_e = ¾ inch = 19.052 mm.
- Le diamètre interne d'un tube d_i = 13.51 mm du type BWG12.
- n : le nombre de tubes en (a).
- m : le nombre de tubes en (b).

Nous supposons une disposition carrée, le pas entre deux tubes est fixé à 1 inch (25.4 mm).

$$1.905 n + 0.635 (n-1) + x_1 = 58 \quad \Rightarrow n = 22 \quad ; x_1 = 2,775 \text{ cm}$$

$$1.905 m + 0.635 (m-1) + x_2 = 48 \quad \Rightarrow m = 18 \quad ; x_2 = 2.915 \text{ cm}$$

Donc :

$$N^{\circ} \text{ tubes} = 18 * 22 = 396 \text{ tubes.}$$

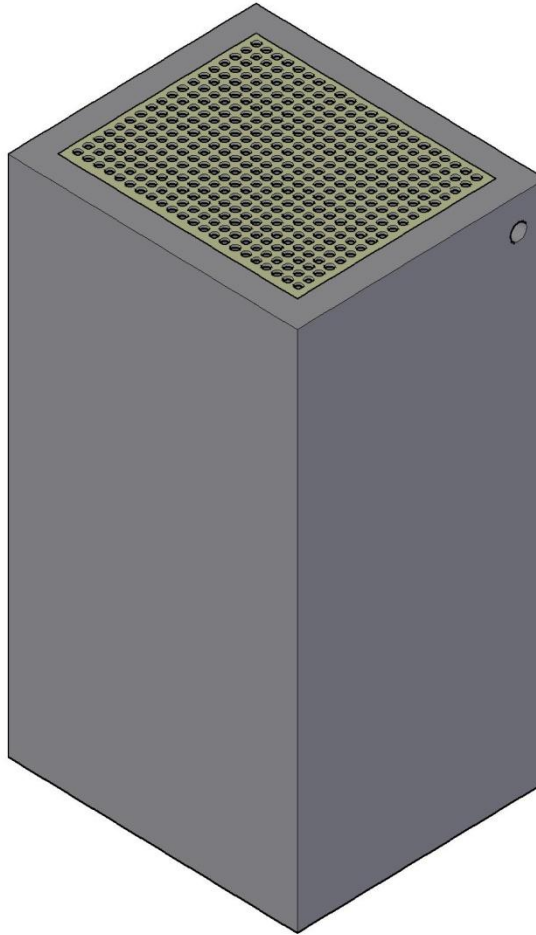


Figure 31: Schéma de l'échangeur de chaleur

- **Calcul de S :**

$$Q = U * S * DTLM$$

Donc :

$$S = Q / (U * DTLM) \text{ Avec : } Q = 80.5 \text{ KW}$$

- **Calcul de U :**

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + R_{encrassement}$$

$$R_{encrassement} = 0.00176 \text{ m}^2\text{K/W}$$

• **Calcul de h_1 :**

La convection se fait le long d'un tube vertical :

$$h_1 = \frac{\lambda * Nu}{d_i} \quad [44]$$

$$Nu = 1.37 * \left(\frac{Ra * d_i}{L} \right)^{0.16} \quad \text{avec} \quad 0.05 < Ra < 10^4 \quad [44]$$

$$Ra = \frac{g * d_i^3 * \beta * (T_p - T_{ext}) * Pr * \rho^2}{\mu^2} \quad [44]$$

$$T_p = \frac{\frac{T_5 + T_6}{2} + T_{ext}}{2} \quad \text{avec} \quad T_{ext} = T_2$$

- La température d'évaluation des valeurs de ρ , μ , Pr est prise à $T_{moy} = \frac{T_5 + T_6}{2}$
- La température d'évaluation de β est T_{ext} .
- $d_i = 0.013$ m
- La longueur des tubes est $L = 1.2$ m
- $\lambda = 1,5207 * 10^{-11} * T_{moy}^3 - 4,857 * 10^{-8} * T_{moy}^2 + 1,0184 * 10^{-4} * T_{moy} - 3,9333 * 10^{-4}$

Application numérique :

Tableau 25: Valeurs du coefficient de convection pour différents ξ

ξ	T_5 (K)	T_6 (K)	Ra	Nu	λ (W/m/K)	h_1 (W/m ² /K)
1,1	2373,87	862,49	315,30	1,68	0,102	12,63
1,2	2260,30	862,28	334,89	1,69	0,098	12,31
1,3	2162,73	862,11	353,11	1,71	0,095	12,04
1,4	2077,99	861,96	370,07	1,72	0,093	11,81
1,5	2003,67	861,83	385,89	1,73	0,091	11,62
1,6	1937,97	861,71	400,65	1,74	0,089	11,45
1,7	1879,45	861,61	414,45	1,75	0,087	11,31
1,8	1826,99	861,52	427,36	1,76	0,086	11,18
1,9	1779,69	861,44	439,47	1,77	0,084	11,06
2	1736,83	861,37	450,84	1,78	0,083	10,96
2,1	1697,80	861,30	461,52	1,78	0,082	10,86
2,2	1662,11	861,25	471,57	1,79	0,081	10,78
2,3	1629,35	861,19	481,05	1,79	0,080	10,70
2,4	1599,17	861,14	490,00	1,80	0,080	10,63
2,5	1571,28	861,10	498,45	1,81	0,079	10,56

- **Calcul de h_2 :**

Approche 1:

Nous considérons en premier lieu que l'échangeur de chaleur dispose de 2 chicanes horizontales espacées de 400 mm, l'épaisseur de la chicane est de 5 mm. La distance laissée libre au niveau de chaque chicane représente 25% du diamètre de la calandre qui est de 580 mm.

Pour un écoulement parallèle aux tubes en régime laminaire : $Re < 2400$;

$$Nu = 3.66 \quad [44]$$

Pour un écoulement parallèle aux tubes en régime turbulent on applique la relation de Dittus-Boelter:

$$Nu = 0.023 * Re^{0.8} * Pr^n \quad [44]$$

n est égal à 0.4 pour un échauffement 0.3 pour un refroidissement.

Pour pouvoir déterminer le régime d'écoulement nous devons calculer la vitesse de l'air dans la calandre, pour ce faire, il faut déterminer la section de passage entre les chicanes.

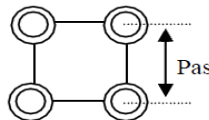
Notons:

$$A = (p - d_e) * (b - e) ; \quad V = \frac{\dot{m}_{air} * P}{\rho * D * A} \quad [45]$$

$$\rho_{air} = \frac{M_{air} * P_{air}}{R * T_{air}} ; \quad T_{air} = \frac{T_2 + T_3}{2} ;$$

$$P_{air} = 4.5 \text{ bar}$$

$$Re = \frac{v * \rho * d_e}{\mu}$$



Disposition carrée

Application numérique :

Tableau 26: Coefficient de convection de l'air dans la calandre (approche1)

A (m ²)	ρ (kg/m ³)	v (m/s)	Re	Nu	h_2 (w/m ² .K)
0,0025	1,82	0,94	687,73	3.66	14.71

Pour différents ξ , nous avons dressé le tableau suivant :

Tableau 27: Nombre de tubes dans l'échangeur en fonction de ξ (approche1)

ξ	T_5 (K)	T_6 (K)	DTLM (K)	U (w/m ² .K)	S (m ²)	N° tubes
1,1	2373,87	862,49	690,0	6,72	17,4	242
1,2	2260,30	862,28	649,0	6,62	18,7	261
1,3	2162,73	862,11	612,7	6,54	20,1	280
1,4	2077,99	861,96	580,3	6,48	21,4	298
1,5	2003,67	861,83	551,2	6,42	22,8	317
1,6	1937,97	861,71	524,8	6,37	24,1	336
1,7	1879,45	861,61	500,6	6,32	25,4	354
1,8	1826,99	861,52	478,4	6,28	26,8	373
1,9	1779,69	861,44	457,8	6,24	28,2	392
2	1736,83	861,37	438,8	6,21	29,5	412
2,1	1697,80	861,30	420,9	6,18	30,9	431
2,2	1662,11	861,25	404,2	6,15	32,4	451
2,3	1629,35	861,19	388,5	6,13	33,8	471
2,4	1599,17	861,14	373,7	6,10	35,3	492
2,5	1571,28	861,10	359,6	6,08	36,8	513

D'après le tableau ci-dessus, la valeur de $\xi = 1.9$ remplit les exigences pour le nombre de tubes de l'échangeur qui ne doit pas excéder les 396.

Nous aurons donc pour une production d'une puissance mécanique de 20 kW par la microturbine les valeurs suivantes :

Tableau 28: Récapitulatif de (approche 1)

ξ	$\dot{m}_{\text{airfroid}}$ (Kg/h)	$\dot{m}_{\text{airchaud}}$ (Kg/h)	$\dot{m}_{\text{biomasse}}$ (Kg/h)	T_1 (K)	T_2 (K)	T_3 (K)	T_4 (K)	T_5 (K)	T_6 (K)	N_{tubes}
1.9	356	262.2	23	293	490	1223	860	1779.69	861.44	392

Nous remarquons par contre que la température de l'air dans les tubes est très importante de l'ordre de 1500°C ce qui nous amène à redimensionner l'échangeur de chaleur pour avoir des températures plus basses et ceci afin d'augmenter la durée de vie des tubes.

Approche 2 :

Nous ajoutons 2 chicanes afin d'augmenter la vitesse dans la calandre et de pouvoir considérer l'écoulement perpendiculaire aux tubes vu que l'espace entre deux chicanes sera réduit à 240 mm.

Puis nous appliquons la relation : $Nu = 0.27 * Re^{0.63} * Pr^{0.36}$ pour $10^3 < Re < 2 * 10^5$ [44].

Application numérique :

Tableau 29: Coefficient de convection de l'air dans la calandre (approche 2)

A (m ²)	ρ (kg/m ³)	v (m/s)	Re	Nu	h_2 (w/m ² .K)
0,00149	1,82	1,59	1468	23,4	74

Pour différents ξ , nous avons dressé le tableau suivant :

Tableau 30: Nombre de tubes dans l'échangeur en fonction de ξ approche 2

ξ	T ₅ (K)	T ₆ (K)	DTLM (K)	U (w/m ² .K)	S (m ²)	N° tubes
1,1	2373,87	862,49	689,8	10,71	10,9	152
1,2	2260,30	862,28	648,8	10,48	11,8	165
1,3	2162,73	862,11	612,5	10,29	12,8	178
1,4	2077,99	861,96	580,2	10,12	13,7	191
1,5	2003,67	861,83	551,0	9,98	14,6	204
1,6	1937,97	861,71	524,6	9,86	15,6	217
1,7	1879,45	861,61	500,4	9,75	16,5	230
1,8	1826,99	861,52	478,2	9,66	17,4	243
1,9	1779,69	861,44	457,7	9,57	18,4	257
2	1736,83	861,37	438,6	9,50	19,3	270
2,1	1697,80	861,30	420,8	9,43	20,3	283
2,2	1662,11	861,25	404,1	9,36	21,3	297
2,3	1629,35	861,19	388,4	9,30	22,3	311
2,4	1599,17	861,14	373,5	9,25	23,3	325
2,5	1571,28	861,10	359,4	9,20	24,3	340

Nous aurons donc :

Tableau 31: Récapitulatif de l'approche 2

ξ	\dot{m}_{air} froid (Kg/h)	\dot{m}_{air} chaud (Kg/h)	$\dot{m}_{\text{biomasse}}$ (Kg/h)	T ₁ (K)	T ₂ (K)	T ₃ (K)	T ₄ (K)	T ₅ (K)	T ₆ (K)	N _{tubes}
2,5	356kg/h	345kg/h	23 kg/h	293	490	1223	860	1571	861	340

La température dans les tubes sera réduite de 200°C elle sera de l'ordre de 1300°C, nous utiliserons l'alliage acier comme matériau pour les tubes.

Tableau 32: Caractéristiques de l'échangeur de chaleur

Coté tube	
Dimensions de la plaque tubulaire	(580*480) mm
Nombre de tubes	396
d_i/d_e	13.51/19.052 mm
Longueur des tubes	1200 mm
Disposition des tubes	carrée
Pas entre les tubes	25.4 mm
Débit air	345 kg/h
Pression air	1bar
Température max	1600 K
Matériau	Acier allié
Coté calandre	
Diamètre calandre	580 mm
Épaisseur panneaux sandwich	60 mm
Nombre de chicanes	4
Distance entre les chicanes	240 mm
Épaisseur chicane	5 mm
Espace de passage libre au niveau de la chicane	25% du diamètre 145 mm
Diamètre tubulure d'entrée	40 mm
Diamètre tubulure sortie	40 mm
Débit air	356 kg/h
Pression air	4.5 bar
Température max	1300 K
Matériau	Acier au carbone

III.3.Dimensionnement de la presse

Le choix de la presse s'est porté sur le modèle 6YL du constructeur **Anyang GEMCO Energy Machinery Co. Ltd.**

Cette machine convient pour l'extraction de l'huile de végétaux, tels que les graines de colza, l'arachide, le soja, les semences de sésame, la graine de coton, la noix de coco, la paume, l'olive, etc.

La machine a pour avantages le taux élevé de production d'huile, l'économie d'énergie et les faibles émissions sonores.

Nous utiliserons la presse 6YL-100 sans moteur vu que la turbine entrainera la visse de la presse, le tourteau sera évacué dans un silo, et l'huile récupérée dans un bac décanteur. Les caractéristiques de la presse sont données dans le tableau suivant :

Tableau 33: Caractéristiques techniques de la presse 6YL-100[34]

Modèle	Capacité (kg/h)	Puissance (kW)	Poids (kg)	Dimensions (mm)	Prix presse + collecteur d'huile en inox (Euro HT)
6YL – 100	200	7.5	480	1705*659*900	2500

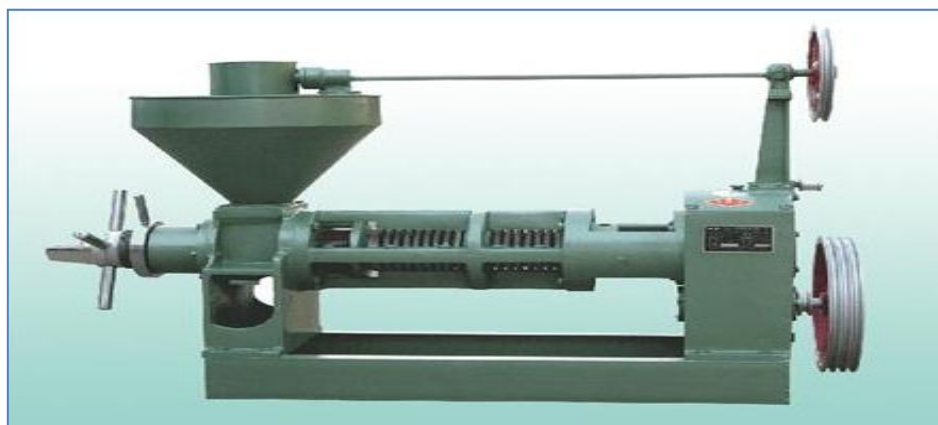


Figure 32: Modèle de presse 6YL-100 [34]

Partie III:

Etude

Technico-économique
et environnement

Nomenclature Partie III

Nom	Description	Unité
PEHD	Polyéthylène haute densité	-
DRI	Délai de retour sur investissement	[an]
VPM	Valeur des paiements	-
A	La dotation pour provisions aux amortissements	[DA]
A ₁	La dotation pour provisions aux amortissements de l'unité	[DA]
A ₂	La dotation pour provisions aux amortissements de l'installation photovoltaïque	[DA]
A ₃	La dotation pour provisions aux amortissements du matériel roulant	[DA]
I	Les investissements	[DA]
I ₁	Investissement de l'unité	[DA]
I ₂	Investissement de l'installation photovoltaïque	[DA]
I ₃	Investissement du matériel roulant	[DA]
N	Durée d'amortissement du photovoltaïque par économie d'énergie	[an]
V	Recettes annuelles	[DA/an]
f_d	Facteur caractéristique du type d'échangeur	-
f_l	Facteur correctif de longueur de tube	-
f_{np}	Facteur tenant compte du nombre de passes côté tubes	-
f_p	Facteur correctif de pression	-
f_t	Facteur correctif de température	-
f_m	Facteur caractéristique de la nature des matériaux employés	-
n	Durée de l'amortissement	[année]
n ₁	Durée d'amortissement de l'unité	[année]
n ₂	Durée d'amortissement de l'installation photovoltaïque	[année]
n ₃	Durée d'amortissement du matériel roulant	[année]

I. Introduction

L'étude technico économique consiste à évaluer la faisabilité et la rentabilité du projet, elle passe par 3 étapes:

- L'estimation avec une méthode relativement simple des investissements à réaliser. Pour ce faire il faudra estimer le coût d'achat des équipements concernés, le coût lié à la mise en œuvre de l'équipement concerné dans le procédé (ce coût comprend les frais de fondation, de raccordement, d'engineering, de main d'œuvre pour le montage plus l'arrêt éventuel de l'installation, les taxes supplémentaires, etc....) et le coût lié à l'opération de l'équipement dans le procédé (par exemple la connexion des appareils de mesures, la régulation, les procédures de sécurité, etc....).
- Le calcul des bénéfices annuels qui seront réalisés par la mise en œuvre de l'investissement. Il faudra ainsi comptabiliser le coût de l'énergie, les coûts de maintenance et les frais de main d'œuvre supplémentaires liés à l'utilisation de cet équipement.
- L'élément temps : l'investissement réalisé au début du projet porte ses effets (produit un bénéfice) pendant une durée fixée. Il faut donc pouvoir comparer l'argent d'aujourd'hui avec des bénéfices produits dans l'avenir [46].

II. Détermination des investissements

II.1. Prix du Mobilab

Le Mobilab est constitué d'un camion semi-remorque et d'un container 30 pieds. Il comprend le prix d'achat, et le prix de pose.

II.1.1. Prix d'achat du Mobilab

Le Prix d'achat du Mobilab regroupe le prix du camion, de la remorque, et du container. On peut aussi opter pour un camion caisse de 30 pieds, qui regroupe les trois. Pour nos estimations, nous nous sommes basées sur ce que l'on trouve sur le marché, ou il y a une large gamme de prix, qui dépendent de la marque, de la puissance du camion, et de l'année (neuf ou d'occasion). Pour le choix de notre Mobilab, la marque et la puissance du camion ne sont pas très importantes.

Tableau 34: Estimation du coût du Mobilab

	Intervalle de prix (DA)	Prix choisit (DA)
Camion	3 000 000 – 10 000 000	5 000 000
Remorque (30 pieds)	1 000 000 – 3 000 000	3 000 000
Container (30 pieds)	200 000 – 400 000	300 000
Total	4 200 000 – 13 400 000	8 300 000

Nous nous fixons donc comme prix d'achat du Mobilab : **8 300 000 DA.**

Prix du Mobilab 8 300 000DA

II.1.2. Prix de pose du Mobilab

Le prix de pose du Mobilab regroupe le prix de tous les travaux qui doivent y être faits (2 portes, 3 fenêtres, 2 ventilateurs de plafonds, 3 extincteurs, 2 échelles, 2 citernes, escabeaux, une armoire et la main d'œuvre estimée à 20 % du prix d'achat du container).

Tableau 35: Estimation du coût de pose du Mobilab

	Prix (DA)
Porte	21 630
Fenêtres	20 085
Extincteurs	7 725
Ventilateurs de plafond	8 240
Échelles	10 300
Escabeaux	7 210
Armoire	4 120
Citerne d'eau de 300l	7 210
Citerne d'hexane calorifugée de 600l	51 500
Main d'œuvre	60 00
Total	198 020

On estime le prix de pose du Mobilab à 200 000 DA.

Prix de pose du Mobilab 200 000 DA

II.2. Prix de la cheminée

Pour l'estimation du prix du ballon d'hexane, nous appliquons la formule suivante :

$$\text{Coût du ballon d'hexane (20 l)} = \text{coût du ballon d'eau chaude(15 l)} * \left(\frac{V_f}{V_r}\right)^F [46]$$

Avec F varie entre 0.5 et 0.7 nous prenons F=0.6

Tableau 36: Estimation du coût de la cheminée

	Prix (DA)
Charpente métallique	6900
Briques	36 554
Conduit de fumées	7250
Conduite d'aération	1423
Ballon d'eau chaude	1081
Ballon d'hexane	1285
Silo	6424
Main d'ouvre	20 600
Total	81 576

Prix de la cheminée = 82 000DA

II.3. Détermination du prix des caissons

Les caissons mobiles sont des parallélépipèdes constitués de plaques en acier inoxydable, munis de roues, d'un panier et d'un robinet de vidange et sont reliés entre eux par des tubes en PEHD. Le prix du caisson devra donc comprendre celui de toutes ses composantes. On estime à 20% le prix des roues, du panier et de l'assemblage du caisson mobile. Pour notre Mobilab, nous disposons de 10 caissons : 6 caissons d'une capacité de 600 litres chacun (1×1×0,6) m et 4 caissons d'une capacité de 100 litres chacun (0.5×0.5×0.4) m.

Prix caisson mobile = (Prix inox/Kg × poids) + (0,2 × Prix inox/Kg × poids) + prix robinet de vidange.

Prix caisson mobile de 600l = (412 × 22) + (0,2 × 412 × 22) + 515 = 11 392 DA.

Prix caisson mobile de 100l = (412 × 6,5) + (0,2 × 412 × 6,5) + 515 = 3728 DA.

Tableau 37: Estimation du coût des caissons

	Prix (DA)
Caissons	83 264
Conduites PEHD	1800
Total	85 064

Le coût des 10 caissons mobiles munis des conduites en PEHD est donc estimé à 85 100DA.

Prix extracteur = 85 100 DA

II.4. Détermination du prix de l'aérocondenseur

Nous disposons de 2 serpentins en inox de 28,26 m de long chacun, et 30 mm de diamètre interne, accompagnés de huit ventilateurs pour accélérer le processus de refroidissement. Le prix comprendra donc celui des serpentins, des huit ventilateurs, ainsi que la main d'œuvre qui est estimée à 10% du prix du condenseur.

Prix serpentin = Prix tubes inox (30/32) / m × longueur = 119 × 28,26 = 3376 DA.

Chaque ventilateur consomme 60W et a un diamètre de 0,5m. Le prix de ventilateurs semblables sur le marché est estimé à 7700DA. Il y a 8 ventilateurs dans notre Mobilab.

Tableau 38: Estimation du coût de l'aérocondenseur

	Prix (DA)
Serpentins	6752
Ventilateurs	61 600
Main d'œuvre	6835
Total	75 187

Prix de l'aérocondenseur = 75 200DA

II.5. Détermination du prix du décanteur pour huile essentielle

Le prix du décanteur est celui d'un essencier en inox de 20L que l'on trouve sur le marché. Nous en avons 2 dans notre Mobilab (un pour la récupération des huiles essentielles, un en cas de panne). Il comprendra aussi le prix du robinet de vidange, de l'entonnoir, des récipients pour huiles essentielles,

Tableau 39: Estimation du coût des décanteurs

	Prix (DA)
Essencier	29 416.5
Récipient + Entonnoir	1545
Robinet de vidange	1030
Flacons d'huiles	3 090
Total	35 081.5

Le prix des décanteurs est donc estimé à 35 100 DA.

Prix du décanteur = 35 100 DA

II.6. Détermination du prix du décanteur Eau- Hexane

Nous prendrons un décanteur d'une capacité de 20 l pour séparer l'hexane de l'eau. Sachant que l'hexane est plus léger que l'eau, nous nous orienterons vers un choix de décanteur pour produits légers.

Le prix du séparateur eau-hexane + robinet de vidange est estimé à 15 000 DA.

Prix du décanteur Eau-Hexane = 15 000 DA

II.7. Détermination du prix de l'installation photovoltaïque

Le prix de l'installation photovoltaïque est calculé par le logiciel Tecsol. Il prend en compte le prix des panneaux solaires, de la batterie, de l'onduleur, de l'appoint de secours, ainsi que celui de l'ingénierie :

Tableau 40: Estimation du coût de l'installation photovoltaïque

	Prix (DA)
Total investissement	3 799 670
Ingénierie	329 600
Total projet	4 129 270

Prix de l'installation photovoltaïque = 4 130 000DA

II.8. Détermination du prix de l'instrumentation et de la tuyauterie

Le prix de l'instrumentation comprend celui des soupapes de sécurité et indicateurs de niveau des ballons, des vannes et débitmètres et des capteurs de pression.

La main d'œuvre pour l'assemblage et l'installation est estimée à 10% du coût de l'instrumentation et de la tuyauterie.

Le coût de l'instrumentation et de la tuyauterie est estimé à 2% du coût des équipements (cheminée + décanteurs + aérocondenseurs + pompe + presse + échangeur de chaleur), le coût de l'instrumentation a été pris en considération dans l'établissement du prix de la microturbine.

Pour l'installation photovoltaïque, tous les coûts liés à sa mise en œuvre ont été pris en considération.

Nous estimons le prix de l'instrumentation et de la tuyauterie à 767 300 DA.

Prix de l'instrumentation et de la tuyauterie = 767 300 DA

II.9. Détermination du prix de la presse

Tableau 41: Estimation du coût de la presse

	Prix (DA)
Presse + collecteur d'huile en inox	312 500
Silo d'alimentation + Silo de récupération des tourteaux	12 848
Bac décanteur	20 000
Total	344 984

Prix de la presse = 345 000 DA

II.10. Détermination du prix de la microturbine

Le coût d'une microturbine varie de 700 \$/kW pour les grandes unités à environ 1100 \$/kW pour les plus petites, ces coûts comprennent le matériel et les logiciels associés. L'ajout d'un système de récupération de chaleur ajoute 75 à 350 \$/kW. La préparation du site et les coûts d'installation varient considérablement d'un endroit à un autre et ajoutent généralement 30 à 70% du coût total.

Les fabricants de microturbines visent un coût futur au-dessous de 650 \$/kW. Cela semble être réalisable compte tenu que le marché s'élargit et le volume de vente augmente. L'entreprise Capstone, par exemple, a vendu plus de 2 400 microturbines en 2003.

Nous prenons le coût d'installation égal à 40% du prix total de la microturbine.

Tableau 42: Estimation du coût de la microturbine

	Prix (DA)
Microturbine à gaz	1 760 000
Coût d'installation	704 000
Total	2 464 000

Prix de la microturbine à gaz = 2 464 000 DA

II.11. Détermination du coût de l'échangeur de chaleur :

L'expression de base pour la détermination du prix d'un échangeur de chaleur à faisceaux tubulaires est donnée par [46]:

$$\text{prix corrigé} = \text{prix de base} * f_d * f_l * f_{np} * f_p * f_t * f_m$$

- **Conditions d'établissement du prix du prix de base :**

Type d'échangeur : simple passe, tête flottante, faisceau amovible.

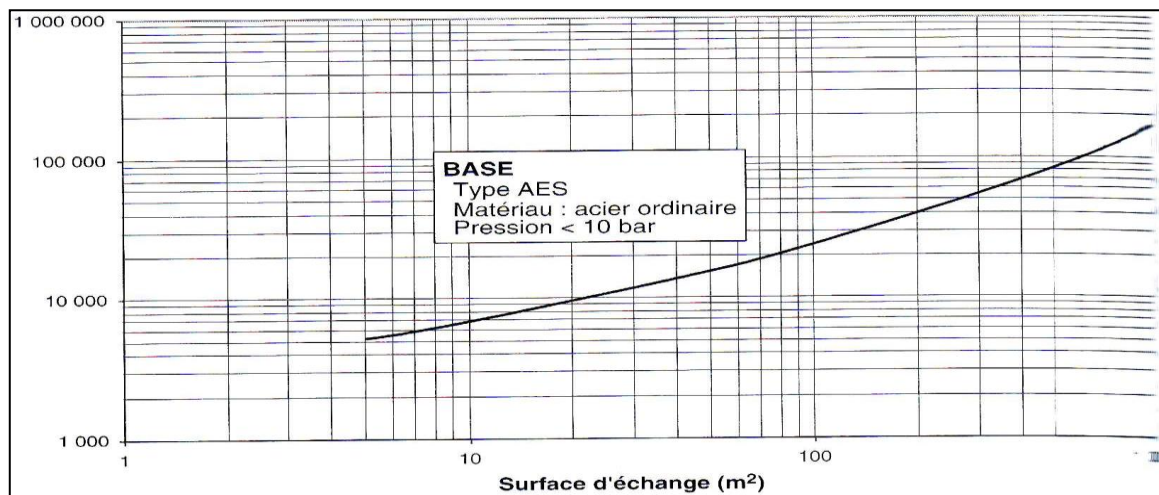
Caractéristiques du faisceau :

- Diamètre des tubes : 3/4" avec BWG = 14 ;
- Pas carré ;
- Longueur 4.9 m.

Autre caractéristiques :

- Pression d'étude : < 10 bar.
- Température d'étude : < 350°C.
- Matériau : acier ordinaire (AO) pour la calandre et les tubes.
- Le montage de l'échangeur lui-même est inclus dans le prix.

Tableau 43: Prix des échangeurs tubulaire [46]



D'après le graphe précédent, pour une surface d'échange de 25.1 m² le prix de base de l'échangeur est de 10 000 euros.

- **Données nécessaires à l'établissement du prix d'un échangeur :**

Pour déterminer le prix de base, seule la connaissance de la surface est nécessaire.

Pour obtenir les facteurs correctifs, il convient de connaître par ordre d'importance :

- Le type.
- La nature du matériau.
- La pression maximale.

Les autres coefficients sont le diamètre des tubes et le pas, la longueur du faisceau, le nombre de passes coté tubes et la température d'utilisation. Ils ont une influence plus modeste [46].

- Valeurs des facteurs correctifs :

Tableau 44 : Influence du type(valeurs globales)[46]

Type	f_d
AES	1.00
AEM	0.90
AEU	0.90
AKT	1.30
BES	0.95
BEM	0.86
BEU	0.86
BKT	1.25
Thermosiphon	1.20

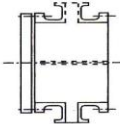
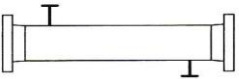

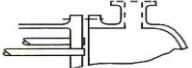
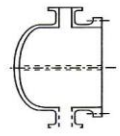
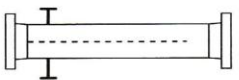

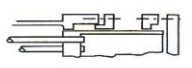
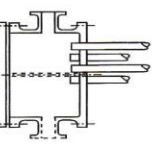
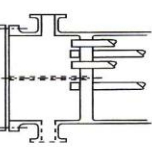
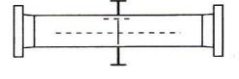
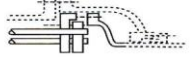
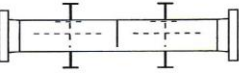
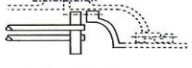
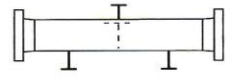
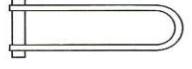
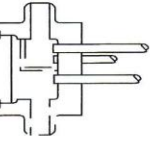
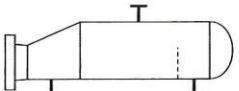
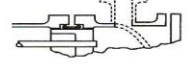
Type de chambre de distribution		Type de calandre		Type de fond de calandre			
A	 Chambre avec couvercle démontable	E	 Calandre à une passe	L	 Plaque tubulaire fixe identique au type "A"		
				M	 Plaque tubulaire fixe identique au type "B"		
B	 Chambre à fond et bride monobloc	F	 Calandre à deux passes avec cloison longitudinale	N	 Plaque tubulaire fixe identique au type "C"		
				P	 Tête flottante avec garniture externe		
C	Faisceau démontable  Plaque tubulaire fixe  Chambre monobloc avec plaque tubulaire et couvercle démontable	G	 Écoulement séparé	S	 Tête flottante avec contre-bride démontable		
				H	 Double écoulement séparé	T	 Tête flottante à passage libre
				J	 Écoulement divisé	U	 Faisceau à tubes en U
D	 Fermeture spéciale pour haute pression	K	 Rebouilleur "type chaudière"	W	 Tête flottante avec garniture externe à détecteur de fuite		

Figure 33: Désignation conventionnelle des échangeurs [46]

Tableau 45: Influence de la longueur du faisceau [46]

Longueur		f_l
(ft)	(m)	
8	2.4	1.35
12	3.7	1.13
16	4.9	1.00
20	6.1	0.92
24	7.3	0.90

Tableau 46: Influence du nombre de passes coté tubes [46]

Nombre de passes	f_{np}
2	1.00
4	1.02
6	1.04
8	1.06
12	1.08

Tableau 47: Influence de la pression maximale [46]

Pression (bar)	f_p	
	Tubes	Tubes et calandre
< 10	1.00	1.00
10 à 20	1.07	1.12
20 à 30	1.17	1.29
30 à 40	1.27	1.48
40 à 65	1.45	1.81
65 à 85	1.63	2.13
85 à 130	2.03	2.85
130 à 180	3.25	3.25

Tableau 48: Influence de la nature du matériau [46]

Matériau calandre/tubes	f_m
AO/AO	1.0
AO/Inox 304L	1.9
AO/Inox 316	2.2
AO/Cu	1.3
AO/Mo	2.0
AO/ Monel	4.0
AO/Ti	10.0

Tableau 49: Influence de la température [46]

Température (°C)	f_t
T < 350	1.00
350 < T < 550	1.08

Lorsque les paramètres qui définissent le faisceau tubulaire (diamètre, pas, longueur, nombre de passe) ne sont pas connus, le mieux est d'adopter des dimensions standard, c'est-à-dire, prendre les facteurs correctifs correspondants égaux à 1.00.

Le prix corrigé de notre échangeur est de :

$$\text{prix corrigé} = 10\,000 * 1.00 * 1.00 * 1.00 * 1.00 * 1.08 * 2$$

$$\text{prix corrigé} = 21\,600 \text{ €}$$

Nous ajoutons 5% pour tenir compte des extras possibles ce qui nous donne un prix total de 22 680€.

$$\text{Prix de l'échangeur} = 2\,835\,000 \text{ DA}$$

II.12. Détermination du coût total de l'installation

Tableau 50: Estimation du coût total de l'installation

	Coût (DA)
Mobilab	8 500 000
Cheminée	82 000
Caissons mobiles	85 100
Aérocondenseurs	75 200
Décanteurs	50 100
Installation photovoltaïque	4 130 000
Instrumentation et tuyauterie	767 300
3 Pompes	22 500
Presse	345 000
Microturbine à gaz	2 464 000
Échangeur de chaleur	2 835 000
Total	19 356 200

Nous estimons le prix total de l'installation à 20 000 000 DA.

$$\text{Prix total de l'installation} = 20\,000\,000 \text{ DA}$$

III. Économies d'eau réalisées :

La durée maximale que peut avoir chaque unité fonctionnant seule est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 51: Temps de fonctionnement maximum de chaque unité

	Unité d'extraction par entrainement à la vapeur d'eau	Unité d'extraction à l'hexane	Unité d'extraction huile d'olive
Temps de fonctionnement maximum que peut avoir chaque unité fonctionnant seule	8 h/Jr 5Jr/semaine 4semaines/mois 8mois/an	8 h/Jr 5Jr/semaine 4semaines/mois 8mois/an	4h/Jr 5Jr/semaine 4semaines/mois 4mois/an La cueillette des olives en Algérie se fait généralement de novembre à février

Nous répartissons dans tout ce qui suit le temps de fonctionnement des 3 unités dans le Mobilab tel que :

Tableau 52: Répartition du temps de fonctionnement de chaque unité dans le Mobilab

Unité	Unité d'extraction par entrainement à la vapeur d'eau	Unité d'extraction à l'hexane	Unité d'extraction huile d'olive
Temps de fonctionnement	8 h/Jr 5J/semaine 4semaines/mois 4mois/an	8 h/Jr 5J/semaine 4semaines/mois 4mois/an	4 h/Jr 5J/semaine 4semaines/mois 4mois/an

L'eau est utilisée dans l'unité d'extraction par entrainement à la vapeur d'eau et étant donné que nous utilisons un aérocondenseur plutôt qu'un condenseur à eau classique et que nous travaillons en circuit fermé, grâce au cohobage, nous utiliserons très peu d'eau pour ce procédé qui, à la base, en demande beaucoup.

Nous possédons une citerne de 300 L, en tout état de cause, nous estimons que nous utiliserons au maximum 300 L/Jr au lieu des 800 L/Jr nécessaires sans le cohobage, soit 6000 L/mois et 24 000 L/an et ceci en se plaçant dans le cas le plus défavorable et le moins probable puisque nous travaillons en circuit fermé.

Pour calculer la consommation en eau d'un condenseur dans une unité d'extraction classique, nous devons d'abord choisir un modèle. Pour un condenseur tubulaire ayant une surface d'échange de 2,45m², une quantité de chaleur équivalente à la notre et une eau de refroidissement à 16°C, le débit horaire d'eau de refroidissement nécessaire à la condensation de notre mélange de vapeur est de 1550 L/h, soit 248 000 L/mois et 992 000 L/an.

Tableau 53: Économies d'eau réalisées par an

	Unité classique d'extraction	Mobilab
Eau pour condenseur (m ³ /an)	992	0
Eau pour extraction (m ³ /an)	64	24
Total	1056	24

Nous réalisons donc une économie de 1 032 000 L d'eau par an.

IV. Économies réalisées sur la facture énergétique

Pour ce qui est des énergies, nous utiliserons de la biomasse et le solaire.

Tableau 54: Facture énergétique du Mobilab

	Unité d'extraction par entrainement à la vapeur d'eau	Unité d'extraction à l'hexane	Unité d'extraction huile d'olive
Quantité de biomasse consommée/jour	400 kg/Jr	24 kg/Jr	92 kg/Jr
Quantité de chaleur produite/jour	2000 KWh/Jr	120 KWh/Jr	460 KWh/Jr

Nous utiliserons aussi le solaire photovoltaïque pour nous alimenter en électricité, ce qui revient à 4,76 KWh/J.

Les économies sur la facture énergétique = Le prix du kilowattheure × Apport énergétique annuel fourni par la biomasse et le solaire.

Le prix de l'électricité étant de 4,18DA/KWh, nous pouvons calculer les économies en électricité de notre Mobilab :

Tableau 55: Économies annuelles réalisées sur la facture énergétique

	Unité d'extraction par entrainement à la vapeur d'eau (Biomasse)	Unité d'extraction à l'hexane (Biomasse)	Unité d'extraction huile d'olive (Biomasse)	Électricité solaire photovoltaïque
Économies sur la facture énergétique	668 800 DA	40 120 DA	153 824 DA	7262 DA

L'énergie fait partie des charges variables d'une entreprise. En utilisant la biomasse et le photovoltaïque, nous supprimons cette charge. Cependant, le photovoltaïque coûte cher (4 130 000 DA), et pour amortir cet investissement grâce aux économies réalisées sur la facture énergétique, il faut un certain nombre d'années.

$$N = \frac{\text{Le coût total de l'investissement énergétique}}{\text{Economies sur la facture énergétique par an}}$$

$$N = \frac{4\,130\,000}{870\,014} = 4.74$$

Nous constatons qu'il faut 4 ans et 8 mois pour amortir l'investissement photovoltaïque seulement à partir des économies d'énergie réalisées grâce à l'utilisation du solaire et de la biomasse.

V. Bilan des émissions de gaz à effet de serre :

Afin d'estimer les émissions de gaz à effet de serre évitées par notre unité, nous devons procéder au calcul de la quantité de CO₂ et NO_x émises par les énergies que nous utilisons et celle émise par une unité classique ayant la même capacité de production que la notre. Il faut noter qu'une unité classique travaille avec des équipements électriques ce qui fait qu'il faut calculer les émissions de la presse et de la chaudière si ces dernières étaient électriques.

Tableau 56: Émissions de CO₂ et de NO_x par source énergétique

	Émissions de CO ₂ (g/kWh)	Émissions de NO _x (g/kWh)
Électricité	900	0,2
Fioul	450	0,6
Photovoltaïque	50	0,16
Biomasse	100	0,2

- Les émissions de gaz à effet de serre de l'électricité sont prises pour une électricité produite à partir du gaz naturel.
- Les émissions de gaz à effet de serre du photovoltaïque sont des émissions indirectes dues à la fabrication des panneaux.
- La biomasse est en circuit fermé: les arbres et les végétaux ne poussent que grâce à l'énergie du soleil qu'ils stockent dans leurs cellules. Lors de sa transformation (ou combustion), nous pouvons récupérer cette énergie et l'utiliser.

La biomasse est en théorie une source d'énergie neutre au niveau du CO₂: les plantes absorbent du CO₂ lorsqu'elles poussent et libèrent la même quantité de CO₂ quand elles sont brûlées. Si nous ne récoltons pas plus d'espèces qu'il ne peut en pousser simultanément, on évite l'exploitation à outrance et on obtient un circuit fermé. À condition que les plantes/forêts exploitées soient replantées.

V.1. Gaz à effet de serre émis par une unité classique

- Pour une unité utilisant une chaudière électrique, les émissions de gaz à effet de serre se calculent comme suit :

Les émissions de CO₂ = Apport énergétique total annuel x Émissions en Kg de CO₂ par kWh.

Les émissions de NO_x = Apport énergétique total annuel × Émissions en Kg de NO_x par kWh.

Tableau 57: Apport énergétique total annuel de la biomasse et du solaire

	Unité d'extraction par entrainement à la vapeur d'eau	Unité d'extraction à l'hexane	Unité d'extraction huile d'olive	Total
Apport énergétique total (Biomasse + solaire) (KWh/an)	160 380.3	9980.3	37 180.8	207 541.9
Apport énergétique (Biomasse) (KWh/an)	160 000	9600	36 800	206 400

Les émissions de CO₂ = 207 542 × 0,9 = 186 787 Kg/an de CO₂.

Les émissions de NO_x = 206 400 × 0,0002 = 41..28 Kg /an de NO_x.

Une unité ayant la même capacité de production que la notre, utilisant une chaudière électrique pour l'extraction et de l'électricité pour faire fonctionner la pompe et les ventilateurs, émettra 186.78 tonnes de CO₂ et 41.28 Kg de NO_x par an.

- Pour une unité utilisant une chaudière au fioul, les émissions de gaz à effet de serre se calculent comme suit :

Émissions de CO₂ = (Apport énergétique chaudière annuel × Émissions fioul Kg de CO₂ par kWh) + (Apport énergétique électrique annuel × Émissions électricité Kg de CO₂ par kWh).

Émissions de NO_x = (Apport énergétique chaudière annuel × Émissions fioul Kg de NO_x par kWh) + (Apport énergétique électrique annuel × Émissions électricité Kg de NO_x par kWh).

Les émissions de CO₂ = (206 400 × 0,45) + (1142.4 × 0,9) = 93 908 Kg / an de CO₂.

Les émissions de NO_x = (206 400 × 0,0006) + (1142.4 × 0,0002) = 124 Kg / an de NO_x.

Une unité ayant la même capacité de production que la notre, et utilisant une chaudière au fioul pour l'extraction, et de l'électricité pour faire fonctionner la pompe et les ventilateurs, émettra 94 tonnes de CO₂ et 124 Kg de NO_x par an.

- Pour une unité utilisant une presse électrique, les émissions de gaz à effet de serre se calculent comme suit :

Les émissions de CO₂ = (Apport énergétique pour la presse × Émissions de l'électricité en Kg de CO₂ par kWh).

Les émissions de NO_x = (Apport énergétique pour la presse × Émissions de l'électricité en Kg de NO_x par kWh).

La presse a une puissance de 7.5 KW et fonctionne 4 h/Jr ce qui nous fait 30 KWh/Jr soit 2400 KWh/an (4mois).

Les émissions de CO₂ = (2400 × 0.9) = 2160 Kg/an.

Les émissions de NO_x = (2400 × 0.0002) = 0.48 Kg/an.

V.2. Gaz à effet de serre émis par le Mobilab

Notre unité utilise une chaudière biomasse et de l'électricité photovoltaïque pour faire fonctionner la pompe et les ventilateurs. Bien que la biomasse absorbe du CO₂ lorsqu'elle pousse et libère la même quantité de CO₂ quand elle est brûlée, nous prendrons tout de même en compte le CO₂ qu'elle dégage, vu que cela prend un certain temps pour qu'il soit réabsorbé par les végétaux.

Émissions de CO₂ = (Apport énergétique biomasse annuel × Émissions de la biomasse Kg de CO₂ par kWh) + (Apport énergétique PV annuel × Émissions PV Kg de CO₂ par kWh).

Émissions de NO_x = (Apport énergétique biomasse annuel × Émissions de la biomasse Kg de NO_x par kWh) + (Apport énergétique PV annuel × Émissions PV Kg de NO_x par kWh).

Les émissions de CO₂ = (206 400 × 0,1) + (1142.4 × 0,05) = 20 697 Kg / an de CO₂.

Les émissions de NO_x = (206 400 × 0,0002) + (1142.4 × 0,00016) = 41.5 Kg / an de NO_x.

Notre Mobilab émettra 20.7 tonnes de CO₂ et 41.5 Kg de NO_x par an.

Le tableau suivant récapitule les émissions de gaz à effet de serre pour les différentes unités :

Tableau 58: Comparatif des émissions de gaz à effet de serre

Émissions	Unité utilisant une chaudière électrique + une presse électrique 7.5KW	Unité utilisant une chaudière au fioul+ une presse électrique 7.5KW	Mobilab (Biomasse + PV)
CO ₂ (tonnes/an)	187	96	20.7
NO _x (Kg/an)	41.3	124	41.5

Il apparaît clairement que l'utilisation des énergies renouvelables et propres nous a permis de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

VI. Calcul économique

VI.1. Marché des huiles en Algérie

VI.1.1. Marché des huiles essentielles

La production d'huiles essentielles existe mais elle reste insuffisante car elle est représentée essentiellement par de petites unités artisanales. En effet, nombre de sociétés en Algérie importent leurs arômes et huiles essentielles. Un grand consommateur tel que le groupe pharmaceutique SAIDAL, consomme environ 800 T/an d'huiles essentielles issues de plantes médicinales pouvant être cultivées localement, dont il importe la totalité, selon les statistiques douanières Algérienne. Des entreprises telles que Hammoud pour l'agroalimentaire, et Sopaluxe pour les cosmétiques, importent elles aussi toutes leurs huiles. Il est donc important et urgent pour l'Algérie de développer sa production d'huiles essentielles et de la diversifier [47].

IV.1.1. Marché de l'huile d'olive

L'oléiculture n'est pas des moindres richesses de l'Algérie, elle fût introduite par les carthaginois, bien avant l'ère chrétienne ; les romains la développèrent à tel point qu'il semble que c'est plutôt par ses huiles que par ses céréales que l'Afrique romaine mérita son nom de « Grenier de Rome »

L'Algérie est classée 7^{ème} producteur de l'huile d'olive au monde avec une production moyenne de 35.000 à 40.000 tonnes par an. Le soutien à la filière constitue donc une priorité des pouvoirs publics qui visent d'abord à couvrir définitivement les besoins du marché local.

Le secteur est déjà en pleine expansion puisque la superficie consacrée à l'olivier est passée de 165.000 hectares en 2000 à 300.000 aujourd'hui, ce qui représente un tiers de la superficie arboricole. L'Algérie ambitionne aussi d'exporter, à l'instar de ses voisins tunisien et marocain qui placent près de 30% de leurs productions respectives sur le marché mondial.

Mais pour concurrencer les autres producteurs méditerranéens, le pays, qui dispose d'atouts indéniables, devra néanmoins relever un certain nombre de défis, tels que la croissance de sa production et de ses capacités de transformation et de conditionnement, l'amélioration de la qualité de son huile par l'instauration d'un label, une organisation professionnelle de la filière oléicole et une amélioration de son organisation à l'exportation [48].

VI.2. Estimation du coût opératoire

Le coût opératoire comprend les charges variables, les charges fixes et la main d'œuvre.

VI.2.1. Les charges variables

Pour l'essentiel, elles comptent deux postes :

Les utilités :

Les utilités traduisent la fourniture à une installation de ses besoins énergétiques. Ayant investi dans les énergies renouvelables, le prix des utilités est donc nul pour notre unité. En effet, l'électricité est produite par des cellules photovoltaïques, dont le prix est compris dans les investissements. La production des énergies thermique et mécanique est obtenue grâce à la combustion de la biomasse.

Notre biomasse est le résidu des plantes dont on extrait l'arôme ou l'huile végétale. Une fois cette matière première payée, la biomasse est donc gratuite, ce qui fait qu'une fois l'investissement énergétique effectué, nous n'avons plus à payer de l'énergie durant le fonctionnement de l'installation.

Les matières premières et réactifs :

Les produits utilisés par notre unité sont la matière végétale, l'eau et l'hexane. Comme nous travaillons en circuit fermé, nous ne consommons que très peu d'eau. Son coût est donc négligeable.

Le coût de l'hexane quant à lui est estimé à 95 DA/kg. Même si nous travaillons en circuit fermé, il subsiste des pertes que nous estimons à 2 % par manipulation soit 6% par jour et donc, au bout de 7 jours de travail il faudra alimenter la citerne en une quantité d'hexane de 300 l, ce qui nous donne 900 l/mois et donc 3600 l/an.

Pour ce qui est de la matière première, son prix varie d'une plante à l'autre, mais il n'excède pas les 30 DA le Kg de plantes séchées, le prix des olives est de 20 DA/Kg.

Tableau 59: Matière végétale traitée pour chaque unité

	Unité d'entraînement à la vapeur d'eau	Unité d'extraction à l'hexane	Unité d'extraction de l'huile d'olive
Quantité de matière végétale traitée (Kg /Jr)	800	102	800
Quantité de matière végétale traitée (Kg/an)	64 000	8160	64 000

Le montant de la matière première et des réactifs est de:

Charges variables = coût de la matière première = (coût de la matière végétale/kg) × (la quantité consommée /an) + (le coût de l'hexane /kg) × (quantité d'hexane consommée/an).
Coût de la matière première = (30 × 64 000 + 30×8160+ 20×64 000) + (95×5 100×0.66).

Charges variables=3 476 150 DA

Nous supposons que la capacité de production restera la même chaque année, et donc le coût de la matière première sera fixe.

VI.2.2. Les charges fixes

Elles recouvrent deux grandes catégories de dépenses, dont la prise en compte est liée à la nature du régime fiscal du pays dans lequel l'installation est implantée:

Les charges fixes d'exploitation :

Elles sont liées au fonctionnement des installations, et regroupent la maintenance, les taxes, les assurances, et les frais généraux. Elles représentent généralement au total 7% par an du montant de l'investissement en matériel.

Pour notre Mobilab, le coût total de l'investissement est de 20 000 000 DA, ce qui revient à un montant de charges fixes d'exploitation de 1 400 000DA par an.

$$\text{Charges fixes d'exploitation} = 1\,400\,000 \text{ DA/an}$$

Les charges fixes de capital:

Elles regroupent la dotation pour provision aux amortissements et les services de la dette liés aux emprunts contractés.

La dotation pour provisions aux amortissements :

Elle mesure la perte de valeur d'une immobilisation, et ce en comptabilisant des charges annuelles, dont la somme correspond au capital investi, qui lui permettra de récupérer le débours d'origine au bout d'une certaine période dite « durée d'amortissement ». Elle permet ainsi de préparer le renouvellement des biens acquis par l'affectation d'une partie des bénéfices à la reconstitution du capital.

Il existe plusieurs méthodes d'amortissement : linéaire, dégressif, dérogatoire, fiscal. Les deux premières sont les méthodes les plus connues. Nous utiliserons pour notre calcul la méthode linéaire, tel que [46]:

$$A=I/n \text{ [46]}$$

La durée de l'amortissement est fonction de l'installation, ainsi nous avons :

Tableau 60:Durée d'amortissement types de diverses installations

Nature de l'installation	Durée d'amortissement (ans)
Unité de chimie organique	10
Installation photovoltaïque	25
Matériel roulant	5

Nous aurons donc :

$$A= A_1 + A_2 + A_3 = I_1/n_1 + I_2/n_2 + I_3/n_3 \text{ [46]}$$

Avec :

X₁ : Matériel de l'unité.

X₂: Installation photovoltaïque.

X₃: Camion.

Application numérique :

$$A = (6\,726\,200/10) + (4\,130\,000/25) + (5\,000\,000/5)$$

$$A = \text{dotation pour provisions aux amortissements} = 1\,837\,820 \text{ DA}$$

$$n = I/A = 10.9 \text{ ans.}$$

La durée d'amortissement de notre unité est inférieure à **11 ans**. Pour que notre installation dégage un bénéfice, il faut que le délai de retour sur investissement soit inférieur à la durée d'amortissement, et donc, inférieur à 11 ans.

Les frais financiers :

Afin de financer le projet, l'investisseur sollicitera un emprunt bancaire, qui représente 70% de l'investissement, et les 30% restant seront à sa charge. Le crédit à moyen terme devra être remboursé sur 5 ans, avec un taux d'intérêt annuel de 8%, et ceci en se plaçant dans le cas le plus défavorable, en réalité les pouvoirs publics encouragent les projets verts et les crédits sont à taux préférentiel.

Tableau 61: Financement de l'investissement

Unité	% de I	Capital (DA)
Apport en fond propre	30	6 000 000
Crédit à moyen terme	70	14 000 000
Total	100	20 000 000

La fonction INTPER sur Excel calcule, pour une période donnée, les intérêts d'un investissement basé sur des paiements périodiques constants, et à un taux d'intérêt constant. Elle est fonction du taux, du montant du prêt contracté, et de la durée de remboursement. On a que 1€=125 DA.

Tableau 62: Calcul des intérêts d'investissement sur Excel

Prêt			112 000 €		
Taux d'intérêts			8%		
Durée (ans)			5		
Périodes	1	2	3	4	5
Les frais financiers	8 960,00 €	7 432,71 €	5 783,24 €	4 001,81 €	2 077,86 €

On constate que le paiement sur les intérêts décroît d'année en année. Cela est dû au fait que les intérêts sont payés sur le solde restant dû.

On peut calculer les frais financiers sur Excel à l'aide de la fonction VPM (Valeur des paiements), qui calcule la valeur des paiements périodiques d'une annuité à taux d'intérêt constant. Elle est fonction du taux d'intérêt, du nombre de périodes, et du montant de l'investissement.

Tableau 63: Calcul VPM sur Excel

Prêt	112 000 €
Taux	8%
Durée (ans)	5
VPM	28 051,12 €

Le montant des dépenses pour le prêt bancaire est de : 3 507 000DA

VI.2.3. La main d'œuvre

Le personnel nécessaire au bon fonctionnement de l'installation sera de 3 agents permanents : un technicien supérieur et deux ouvriers, dont l'un devra avoir un permis de conduire poids lourds. Les salaires sont détaillés par catégorie professionnelle comme suit :

Tableau 64: Salaires par catégorie professionnelle

Catégorie	Nombre	Salaires (DA/mois)
Technicien supérieur	01	35 000
Ouvriers	02	25 000 × 2

Les charges comprendront donc 140 000DA pour la main d'œuvre/mois.

Coût de la main d'œuvre = 1 020 000 DA/an

Le coût opératoire est égal à la somme des charges variables, des charges fixes (d'exploitation et de capital), et du coût de la main d'œuvre.

Coût opératoire = Coût de la main d'œuvre + Frais financiers + Amortissements + Charges fixes d'exploitation + Charges variables [46]

Tableau 65: Résumé du coût opératoire

Charges variables	Charges fixes d'exploitation	Amortissements	Frais financiers	Main d'œuvre	Coût opératoire
3 476 150	1 400 000	1 837 820	3 507 000	1 020 000	11 240 970

Coût opératoire = 11 240 970 DA

VI.3. Les recettes annuelles

Afin de déterminer les recettes annuelles de notre Mobilab, nous devons émettre les suppositions suivantes :

- Notre unité fonctionnera à 100% de sa capacité dès la première année et utilisera 800 Kg/Jr de matière végétale pour l'unité d'entraînement à la vapeur d'eau, 153 Kg/Jr de matière végétale pour l'unité d'extraction à l'hexane et 800 Kg/Jr d'olives pour l'extraction de l'huile d'olive.

- Le rendement des huiles essentielles varie entre 1et 4%, pouvant aller parfois jusqu'à 5%. Nous prendrons un rendement moyen de 2% (masse d'huile essentielle produite / masse de matière végétale). Nous produirons donc 16 Kg d'huile essentielle par jour, soit 1280 Kg/an. Le rendement en huile d'olive est de 20% nous produirons donc 160 l/Jr.

- L'extraction à l'hexane nous donne 30 l/Jr de miscella, cette dernière sera traitée dans une usine. Nous estimons le prix de vente de la miscella à 1 000 DA/l.

- Le prix moyen du Kg d'une huile essentielle pure est de 10 000DA.

- Le prix moyen du litre d'huile d'olive est de 400 DA.

$V = \text{recettes annuelles} = \text{prix du Kg} \times \text{quantité produite en Kg/an.}$

$V = 10\,000 \times 1280 + 400 \times 12\,800 + 1000 \times 2400 = 20\,320\,000 \text{ DA.}$

Les recettes annuelles = 20 320 000DA

VI.4. Le délai de retour sur investissement (DRI)

Le délai de retour sur investissement est la durée au bout de laquelle le montant des recettes globales diminuées de celui des sorties, y compris les taxes, sont égaux à l'investissement initial. C'est donc la période au bout de laquelle on commence à générer des bénéfices. Elle se calcule par la formule suivante :

$$\text{DRI} = I / \text{Gain moyen annuel [46]}$$

Le gain moyen annuel = recettes annuelles - coût opératoire [46]

Le gain moyen annuel = 20 320 000 - 11 240 970 = 9 079 030 DA/an.

$$\text{Le gain moyen annuel} = 9\,079\,030 \text{ /an}$$

$$\text{DRI} = 2.2$$

Le délai de retour sur investissement est de 2 ans et 2 mois il est donc < à 3 mois ce qui est très encourageant.

Conclusion

Conclusion

À l'issu de cette étude nous pouvons conclure que:

- la biomasse peut être utilisée pour la production de travail mécanique, en plus de sa capacité à fournir de l'énergie thermique.
- L'insertion de trois unités d'extraction de plantes, dans un Mobilab permet une exploitation polyvalente selon la saison et le besoin.

Nous avons constaté qu'avec une installation simple, innovante et technologiquement réalisable, nous pouvons atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés :

- L'utilisation d'une unité mobile permet une adaptation au site, et annule les frais de transport et de stockage du substrat végétal.
- L'utilisation d'une cheminée en briques plutôt qu'une chaudière permet de réaliser un gain d'argent, de place, et de réduire les pertes de chaleur.
- Le conduit de fumée de la cheminée est démontable, il est remplacé par l'échangeur de chaleur pour la production d'énergie mécanique lors de la trituration des olives.
- L'utilisation des caissons mobiles est plus économique et offre une facilité de manipulation ainsi qu'un gain d'espace considérable.
- La substitution du condenseur à eau par un serpentín et des ventilateurs, ainsi que l'utilisation du cohobage répond à notre objectif d'économiser l'eau et d'en réduire les rejets.
- L'utilisation d'une microturbine à gaz pour la production de travail nécessaire au fonctionnement de la presse au lieu d'un moteur Diesel répond à notre objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre.
- Un passage simple et pratique d'une unité à une autre.
- L'utilisation de la biomasse et du solaire photovoltaïque permet à l'unité d'être énergétiquement autonome.

L'objectif final étant la promotion des modules industriels mobiles de faible capacité, pouvant s'adapter aux contraintes techniques, économiques et environnementales en intégrant les énergies renouvelables, dans l'optique de réduire les émissions de gaz à effet de serre et s'inscrire dans le cadre du développement rurale.

L'étude technico économique montre que l'unité est technologiquement réalisable, économiquement viable, et peut constituer un parfait exemple pour toute industrie générant des déchets d'origine végétale.

Bibliographie

Références électroniques

[1] www.greenstone.bf.refer.org.

[2] www.pennybio.com.

[3] www.naturelvie.com.

[4] www.labotp.org.

[5] www.pagesperso-orange.fr.

[6] www.bivea.fr.

[7] www.labo-hevea.com.

[8] www.etfleurlavie.com.

[9] www.energie-sante.net.

[10] www.vulgarisation.net.

[11] www.olvea.fr.

[12] www.prolea.com.

[13] www.ekopedia.org.

[14] www.tunisianindustry.nat.tn.

[15] www.thermoptim.org.

[16] www.hydroquebec.com.

[17] www.pertorqueo.com.

[18] www.maison-huile.com.

- [19] www.unctad.org.
- [20] www.ifhvp.fr.
- [21] www.fms.uni-rostock.de.
- [22] www.eprints.usm.my.
- [23] www.energy.ca.gov.
- [24] www.corbelet.com.
- [25] www.aos.wisc.edu.
- [26] www.sites.google.com.
- [27] www.wikipedia.org
- [28] www.azprocede.fr.
- [29] www.armstronginternational.com.
- [30] www.sba-int.ch.
- [31] www.jc.castaing.free.fr.
- [32] www.energies-renouvelables.org.
- [33] www.apere.org.
- [34] www.presse.a.huile.over-blog.com.

Livres

- [35] E. GEORGIEV. ET A. STOYANOVA. -2000 "*Handbook du spécialiste de l'industrie des arômes*", UFT Academic Publishing House, Plovdiv, Bulgarie, p 561.
- [36] F. Roger, G.Champetier. "*Industrie des corps gras*". Paris: Technique et Documentation, 1974.
- [37] "*Small-Scale cogeneration*". Handbook- Second Edition. Marcel Dekker.2003.

- [38] G.Benhayoun, 5.Lazzeri. "*L'olivier en Méditerranée: du symbole à l'économie*". Paris: L'Harmattan, 2007.
- [39] Jean Louis Bretonnet. "*Thermodynamique générale et appliquée*". Paris: Ellipse, 2008.
- [40] John H. Perry. "*Chemical Engineer's Handbook*". Mc Graw, Hill Book Company, 1963.
- [41] Adrian Bejan, Allan D.Kraus. "*Heat Transfer Handbook*". New Jersey, United States of America: WILEY, 2003.
- [42] Roger Kling. "*Thermodynamique Générale et applications*". Paris: Technip, 1980.
- [43] Pierre Wuithier. "*Raffinage et Génie Chimique*". Paris: Institut Français du Pétrole, 1972.
- [44] René Lelee. "*Transfert de Chaleur*", Techniques de l'Ingénieur, Dossier n° J1080.
- [45] André Bontemps, Allain Garrigue, Charles Boubier... "*Echangeur de Chaleur, dimensionnement thermique*", Technique de l'Ingénieur, B2342.
- [46] Alain Chauvel, Gilles Fournier, Claude Raimbault. "*Manuel d'évaluation économique des procédés*". Paris: TECHNIP, 2001.

Thèses

- [47] E-H BENYOUSSEF, Amina NAÏT SIDI AHMED, Louisa ALLOUACHE. "*Potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans une unité d'extraction d'huiles essentielles mobile*". Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie. 24 Juin 2009.

Article de journal

- [48] B.Dalila. "*Les prix de l'huile d'olive flambent*". LE MAGHREB Le Quotidien de l'Economie, 18-02-2010.

Annexes

Annexe 1
Fiche technique du container

	Mobilab 30 pieds	
Dimensions intérieures (m)	Longueur	9.00
	Largeur	2.30
	Hauteur	2.40
Ouverture de portes (m)	Largeur	2.286
	Hauteur	2.278
Poids de la tare (Kg)	2492	
Capacité en volume (m³)	49.68	
Capacité de chargement (Kg)	24 749	
Prix (DA)	300 000	

Annexe 2
Fiche technique de la cheminée

	Dimensions (m)		Nature du matériau	Nombre de briques	Poids (Kg)
Foyer	Hauteur	0.9	Brique Réfractaire	307	276
	Profondeur	0.7			
	Longueur	1.2			
Avaloir	Hauteur	1.27	Brique Réfractaire	200	180
	Profondeur	0.7			
	Longueur	0.6			
Conduit de fumée	Hauteur	1.27	Acier inoxydable		16
	Profondeur	0.7			
	Longueur	0.6			
Ossature en charpente métallique	Hauteur	0.03	Cornières profilés en U en acier inoxydable		33
	Profondeur	0.06			
	Longueur	20			
Silo	Hauteur	0.6	Acier inoxydable		10.8-14.4
	Profondeur	0.6			
	Longueur	1.3-1.4			
Conduit d'aération	Diamètre	0.25	Acier inoxydable		3.14
	Longueur	0.8			
Ballon d'eau	Diamètre	0.3	Acier inoxydable		2
Ballon hexane	Diamètre	0.4	Acier inoxydable		2.4
Poids total	518.64-521.44				
Puissance de la cheminée (KW)	164.15				
Capacité de la cheminée (Kg)	130				
Prix de la brique (DA)	36 554				
Prix du conduit de fumée (DA)	7250				
Prix du conduit d'aération (DA)	1423				
Prix du silo (DA)	4752-6424				
Prix de la charpente (DA)	6900				
Prix des ballons (DA)	1081+1285				

Annexe 3
Fiche technique des caissons mobiles
et du serpentin

	Dimensions (m)		Nature du matériau	Poids (Kg)	Capacité (Kg)	Prix (DA)
Grand Caisson mobile	Hauteur	1.0	Acier inoxydable	22	100	11 392
	Profondeur	0.6				
	Longueur	1.0				
Petit caisson mobile	Hauteur	0.4	Acier inoxydable	6.5	17	3728
	Profondeur	0.5				
	Longueur	0.5				
conduites	Diamètre	0.030/0.032	PEHD	0.8		1800
	Longueur	8				
Robinet de vidange	Diamètre	0.015/0.021	Corps laiton nickelé	4.3		515

			Mobilab	Nature du matériau
Serpentin	Dimensions (m)	Diamètre	0.030/0.032	Acier inoxydable
		Longueur	28.26	
	Nombre de rangées		16	
	Overall UA(KJ/h.°C)		11081.83	
	Poids (kg)		19.2	
	Prix (DA)		6752	
ventilateur	Nombre		8	
	Diamètre (m)		0.500	
	Consommation électrique (W)		480 (60x8)	
	Débit d'air (m ³ /h)		2500	
	Prix (DA)		7700	

Annexe 4

Fiche technique du décanteur et de la pompe

		Mobilab	Nature du matériau
Décanteur	Hauteur (m)	0.3	Vase florentin en cuivre
	Volume (m ³)	0.02	
	Hauteur de la sortie de l'huile essentielle	0.2	
	Nombre de décanteur	2	
	Poids (kg)	3.1	
	Prix (DA)	29 416.5	
Entonnoir	Prix (DA)	1545	Acier inoxydable
Robinet de vidange	Diamètre (m)	0.015/0.021	Corps laiton nickelé
	Poids (kg)	4.3	
	Prix (DA)	1030	
Réceptif huiles essentielles	Volume (m ³)	0.006	Acier inoxydable
	Nombre	2	
	Prix (DA)	3090	

Pompes			
Dimensions (m)	Hauteur	Longueur	Profondeur
	0,305	0,135	0.100
Type	Pompe doseuses		
Nature du matériau	Acier inoxydable ; PVC ; PP ; PVDF		
Poids (Kg)	8		
Débit maxi (l/h) – pression max (bar)	114 - 4		
Hauteur de refoulement (m)	1,126		
Caractéristiques moteur mono	230v/50Hz – 0,05 KW – 0,85 A		
NPSH disponible(m)	9,907		
Efficacité	90%		
Nombre de pompes	3		
Prix	15 000		

Annexe 5

Fiche technique de l'installation photovoltaïque

Mobilab	
Production électrique (Wh)	4760
Nombre total de modules	30
Surface approximative des modules (m ²)	15
Orientation (°)/Sud	0
Inclinaison la plus favorable (°)	15
Intensité maximum de charge (A)	43.75
Investissement hors taxes	
Total investissement	36.89 (k€)
Ingénierie	3.2 (k€)
Total projet	40.09 (k€)

Panneau photovoltaïque			
Dimensions	Épaisseur	Longueur	Profondeur
	0.036	1.160	0.433
Surface (m ²)	0.5		
Nature du matériau	Panneau solaire poly cristallin Cadre aluminium		
Poids (kg)	6.5		
Puissance (Wc)	50		
Tension (V) – Intensité maximum de la charge (A)	12-37.92		

			Mobilab
Batterie	Dimensions (mm)	Hauteur	630
		Longueur	392
		Largeur	211
	Nombre de jours d'autonomie		5
	Profondeur de charge maxi (%)		70
	Tension batterie (V)		24
	Tension de distribution (V)		230
	Capacité batterie (AhC100)		1700
	Durée de recharge (h)		38
	Taux de recyclage nominal journalier(%)		11.67
Poids (kg)		95	

			Mobilab
Onduleur	Dimensions (mm)	Hauteur	195
		Longueur	120
		Largeur	350
	Tension entrée onduleur (V)		24
	Puissance installée (W)		595
	Puissance maxi au démarrage (W)		1005
	Puissance onduleur conseillée(VA)		600
	Poids (kg)		11.3

			Mobilab
Kit d'intégration toiture	Dimensions (mm)	Nombre	2
		Longueur	2.35
		Largeur	3.04-3.47
	Type de kit		Cadres avec rails de fixation et pieds amovibles
	Matériau		Charpente métallique cornière en U en acier inox

			Mobilab
Chargeur	Dimensions (mm)	Hauteur	75
		Longueur	340
		Largeur	190
	Capacité chargeur (A)		85
	Puissance chargeur (W)		3300
	Puissance mini du groupe (VA)		4680
Poids (kg)		4.2	

Annexe 6

Fiche technique de la presse et de la microturbine à gaz

Presse			
Dimensions (m)	Hauteur	Longueur	Profondeur
	0.9	1.705	0.659
Type	Modèle 6YL-100		
Poids (Kg)	480		
Débit maximum (kg/h)	200		
Puissance (KW)	7.5		
Prix (DA)	345 000		

Microturbine à gaz	
Rendement isentropique du compresseur	0.8
Rendement isentropique de la turbine	0.85
Température d'entrée du compresseur (K)	293
Température d'entrée de la turbine (K)	1223
Température sortie de turbine (K)	860
Pression d'entrée du compresseur (bar)	1
Pression d'entrée de la turbine (bar)	4.5
Puissance nette de sortie de la turbine (KW)	20
Débit d'air (kg/h)	356
Rendement mécanique de la turbine (%)	25
Prix (DA)	2 464 000

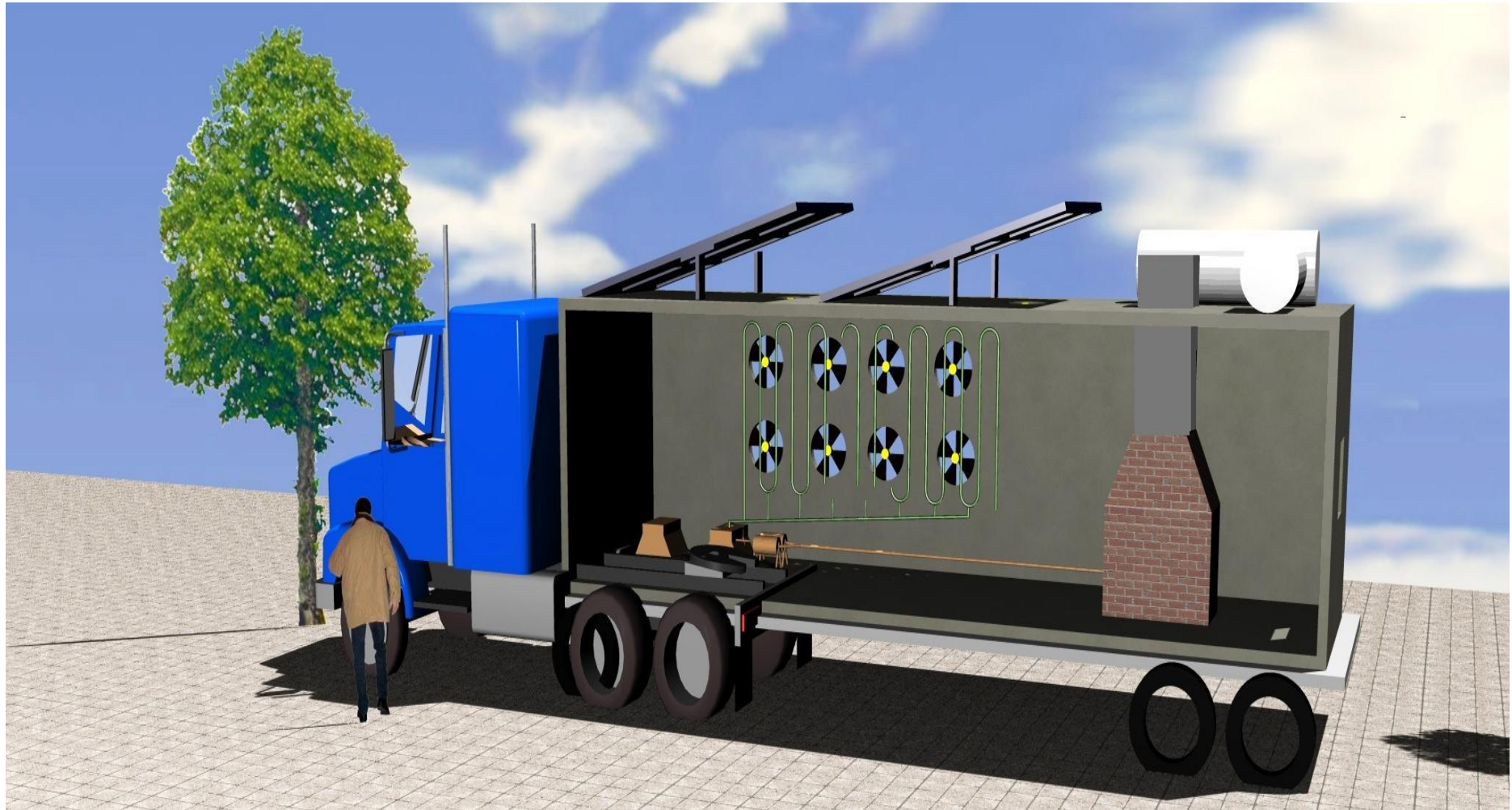
Annexe 7
Fiche technique de l'échangeur de chaleur

Coté Tube	
Dimensions de la plaque tubulaire (mm)	(580*480)
Nombre de tubes	396
d_i/d_e (mm)	13.51/19.052
Longueur des tubes (mm)	1200
Disposition des tubes	carrée
Pas entre les tubes (mm)	25.4
Débit air (Kg/h)	345
Pression air (bar)	1
Température max (K)	1600
matériau	Acier allié
Coté calandre	
Diamètre calandre (mm)	580
Épaisseur panneaux sandwich (mm)	60
Nombre de chicanes	4
Distance entre les chicanes (mm)	240
Épaisseur chicane (mm)	5
Espace de passage libre au niveau de la chicane (mm)	25% du diamètre 145
Diamètre tubulure d'entrée (mm)	40
Diamètre tubulure sortie (mm)	40
Débit air (Kg/h)	356
Pression air (bar)	4.5
Température max (K)	1300
matériau	Acier au carbone
Prix (DA)	
2 835 00	

Annexe 8
Fiche technique sécurité

		Mobilab	
Sécurité	Porte	Nombre	1
		Hauteur (m)	2.0
		Largeur (m)	1.2
		Matériau	Acier, cadre cornière U en inox
		Prix (DA)	21 630
	Issues de secours	Nombre	3
		Hauteur(m)	1.0
		Largeur (m)	0.8
		Matériau	Verre, cadre cornière en U inox
		Prix (DA)	20 085
	Extincteurs	Nombre	3
		Prix (DA)	7 725
	Ventilateurs du plafond	Nombre	2
		Consommation (Wh)	320
		Prix (DA)	8 240
	Échelles	Longueur (m)	3.0
		Prix (DA)	10 300

Vue intérieure de l'unité d'extraction mixte



Vue d'ensemble intérieure : Unité d'extraction mixte + Unité d'extraction de l'huile d'olive

