

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique – Alger
Département de Génie Chimique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de Fin d'Etudes

Thème

Potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans
une unité d'extraction d'huiles essentielles mobile

Dirigé par :

Pr. BENYOUSSEF E-H

Présenté par :

NAÏT SIDI AHMED Amina

ALLOUACHE Louisa

Soutenu le 24 Juin 2009 devant le jury composé de :

PR CHITOUR C-E.Président
PR DERRICHE R. Examineur
PR HADDADI M Examineur
Mme AZIZA M-A. invitée
Pr BENYOUSSEF E-H..... Rapporteur

Promotion 2009

Remerciements

Nous tenons à témoigner notre profonde reconnaissance à Monsieur E-H. BENYOUSSEF, professeur à l'ENP, pour nous avoir confié ce sujet ; pour sa disponibilité, mais aussi pour ses encouragements, et ses conseils, sans lesquels ce travail n'aurait pas pu aboutir.

Nous tenons à remercier :

Le Professeur C-E. CHITOUR de l'ENP, pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury,

Le Professeur M. HADDADI de l'ENP, pour l'aide qu'il nous a apporté, et pour avoir accepté d'être membre de notre jury.

Le Professeur R. DERRICHE de l'ENP, et Melle M-A. AZIZA maître de recherche au CDER, pour avoir accepté d'examiner notre travail.

Madame S. CHARCHARI et Madame F. MEZIANI pour l'aide qu'elles nous ont apporté et les conseils qu'elles nous ont prodigués.

Tous les enseignants du Génie Chimique, pour leur disponibilité, leur gentillesse, et la qualité de leur enseignement.

Dédicaces

À mes très chers parents

À mon frère Hamza et ma très chère et adorable sœur Samia sans oublier Soulef.

Pour leur soutien moral et leur affection.

À la mémoire de ma grande mère Sidi Saïd Djedjiga

À mes très chères cousines Lamia et Amel

À mes adorables petites filles chéries Rania et Yasmine que j'aime tant.

À toutes mes tantes et mes oncles, spécialement ma tante Djemmy, Naima et mon oncle Mala.

À mes grands parents

À toute La Famille Naït Sidi Ahmed, et la famille Chawi.

À mes amis (es) : Sheryn, Djazia, Henda, Fadi, Yanis, surtout ilhem pour sa précieuse aide et soutien.

Je tiens à remercier une personne très particulière pour moi et qui est toujours à mes côtés Aida.

Au meilleur binôme que j'ai jamais eu Louisa.

Une dédicace très spéciale : à mon adorable Chat « NemNem » qui a fait des nuits blanches avec moi tout au long de mon PFE.

À tous ceux qui me sont chers.

Je dédis ce modeste travail...

Avec plein d'affection, Votre Angelot

À mes parents, ma sœur Leila, mes amis, ma famille
Au meilleur binôme du monde, Amina
À tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à ce travail...

Louisa

Résumé / Abstract / ملخص

الموضوع: قابلية إدماج الطاقات المتجددة في وحدة استخلاص الزيوت الأساسية متنقلة.

ملخص:

هته الدراسة عبارة عن تصميم لوحدة متنقلة لاستخلاص الزيوت الأساسية مستخدمة الطاقات المتجددة (الطاقة الشمسية و النباتية) و غير ملوثة للمحيط.

الفكرة الأساسية لهته الوحدة، تتمثل في اقتصاد الطاقة بإدماج فيها طاقات متجددة و استعمال نفاياتها الصلبة والسائلة دون الرمي بهم إلى الخارج بل تستفيد من الماء الناتج من التكثيف بواسطة مبرد هوائي ذات أنبوب ملفوف، و تحول هذا الماء إلى بخار لاستخلاص الزيت الأساسية من النبتة، كما أن الوحدة تستعمل النفايات النباتية الناجمة من عملية الاستخلاص لإنتاج الطاقة بحرقها.

استعمال الوحدة المتنقلة للطاقات المتجددة و اقتصادها للمياه يجعلها وحدة متحركة ذاتيا و مثال حي تقتدي به الوحدات الصناعية الأخرى في استخلاص الزيوت الأساسية.

الكلمات الافتتاحية

وحدة متنقلة - استخلاص الزيوت الأساسية - الطاقات المتجددة - الطاقة النباتية-الطاقة الشمسية
الفلوطا ضوئية - اكتفاء ذاتي طاقي- اقتصاد الطاقة- اقتصاد الماء- المبرد الهوائي- البيئة.

Thème : Potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans une unité d'extraction d'huiles essentielles mobile.

Résumé

Cette étude porte sur la conception d'une unité mobile d'extraction par entrainement à la vapeur d'eau, s'inscrivant dans le cadre du développement durable et du respect de l'environnement.

L'unité puise entièrement l'énergie nécessaire à son fonctionnement à partir de ressources renouvelables (Energie solaire et biomasse), elle recycle ses rejets solides et ne génère pas d'effluents liquides grâce au cohobage et à la mise en place d'un système de condensation à air par le biais d'un serpentin développé en surface.

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 - Energies renouvelables -Biomasse –Solaire photovoltaïque – Autonomie énergétique - Economie d'énergie -Economie d'eau - aérocondenseur – cohobage -environnement.

Topic: Integration Potential of the renewable energies in a mobile unit extraction of essential oil.

Abstract

This study concerns the conception of a mobile unit of extraction by steam training, registering within the framework of Sustainable Development and respecting environment. Unit scoops out entirely the necessary energy for its functioning from renewable means (Solar energy and biomass), it recycles its solid rejections and does not generate liquid effluents thanks to the cohobation and the installation of a condensation system with air using a streamer developed in surface.

The technical-economic study shows that our unit is technologically accomplishable, economically viable, and can constitute a perfect example for any industry generating waste of plants.

Key Words:

Mobile extraction unit- Essential oils - Renewable energy - Biomass - Solar photovoltaic - Energy saving - Energy independence- Water saving - Vacuum steam condenser – Cohobation- environment.

Sommaire :

<u>Introduction</u>	<u>1</u>
----------------------------------	-----------------

Chapitre I : Généralités

<u>A. Les huiles essentielles</u>	<u>2</u>
--	-----------------

I. Définition d'une huile essentielle	2
II. Propriétés d'une huile essentielle	2
II.1. Propriétés organoleptiques	2
II.2. Propriétés physiques	2
II.3. Propriétés chimiques et chémotypes	2
II.4. Classification biochimique des huiles essentielles	3
III. Utilisation des huiles essentielles	3
IV. Stockage et conservation des huiles essentielles.....	5

<u>B. Procédés d'extraction des huiles essentielles.....</u>	<u>5</u>
---	-----------------

I. Hydrodistillation	5
II. Distillation par entraînement à la vapeur et cohobage	7
III. Enfleurage	8
IV. Extraction aux solvants volatils	8
V. Expression	9
VI. Hydrodiffusion	9
VII. Extraction par CO ₂ super critique.....	9

<u>C. Unité Classique d'extraction d'huiles essentielles</u>	<u>10</u>
---	------------------

I. Chaudière	10
I.1. Classification en fonction de leur technologie.....	10
I.1.1. Chaudières à tubes de fumées	10

I.1.2. Chaudière à tube d'eau	11
I.1.3. Chaudières électriques	12
I.2. Classification en fonction de leur rendement	13
I.2.1. Chaudières à basse température et à condensation	13
I.2.2. Chaudière au fioul et électro-fioul	13
I.2.3. Chaudières au gaz et à condensation.....	13
I.2.4. Chaudières à haute performance	13
I.3. Classification en fonction de leurs combustibles.....	13
I.3.1. Chaudières à foyer unique	13
I.3.2. Chaudière à double foyer	13
I.2.3. Chaudières duo.....	13
I.2.4. Chaudières compactes.....	13
I.4. Consommation des différentes chaudières	14
I.4.1. Chaudières électriques	14
I.4.2. Chaudières au fioul et au gaz naturel	14
I.5. Prix d'une chaudière	15
I.5.1. Chaudière électrique.....	15
I.5.2. Chaudière au fioul	15
II. Extracteur ou alambic.....	15
II.1. Description.....	15
II.2. Prix d'un alambic.....	16
III. Condenseur.....	17
III.1. Description	17
III.2. Condenseur à eau.....	18
III.3. Consommation en eau	18
III.4. Prix d'un condenseur à eau.....	18
IV. Décanteur (essencier ou vase florentin)	18
IV.1. Description	18

IV.2. Matériau utilisé.....	20
IV.3. Phénomènes physiques dans un essencier.....	20
IV.3.1. La décantation	20
IV.3.2. La coalescence.....	21
<u>D. Les énergies renouvelables</u>	<u>21</u>
I. Sources d'énergies renouvelables	21
I.1. L'énergie éolienne	21
I.2. L'énergie hydraulique	21
I.3. L'énergie solaire	21
I.4. La géothermie.....	22
I.5. La biomasse.....	22
II. Energies choisies	22
III. La biomasse.....	22
III.1. Définition	22
III.1.1. Conversion thermochimique (combustion)	23
III.1.2. Conversion biologique ou biogaz	23
III.1.3. Biocarburants.....	24
III.2. Caractéristiques physico-chimiques de la biomasse	25
III.2.1. Teneur en humidité	25
III.2.2. Teneur en en cendres	25
III.2.3. Pouvoir calorifique	25
III.2.4. Masse volumique	25
III.2.5. Granulométrie	26
III.2.6. Composition	26
IV. L'énergie solaire	26
IV.1. L'énergie solaire photovoltaïque.....	26
IV.1.1. Présentation	26

IV.1.2. Historique du photovoltaïque	27
IV.1.3. Principe de fonctionnement	27
IV.1.4. Technologie et rendement des panneaux solaires photovoltaïques.....	27
IV.1.5. Puissance photovoltaïque	28
IV.1.6. Installations et cout du photovoltaïque	28
IV.2. L'énergie solaire thermique	29
IV.2.1. Présentation	29
IV.2.2. Les capteurs plans	29
IV.2.3. Les capteurs à concentration	30
IV.3. Potentiel solaire Algérien.....	30

Chapitre II : Bilans Energétiques

<u>A. Production d'énergie par la biomasse</u>	<u>32</u>
I. Pouvoir calorifique de la biomasse	32
II. Estimation des pertes de chaleur	32
II.1. Pertes par gaz brûlés	32
II.2. Pertes à travers les parois	33
II.3. Pertes par imbrulés	34
III. Bilan énergétique	34
III.1. Estimation des chaleurs spécifiques moyennes	34
III.2. Détermination des besoins énergétiques	35
<u>B. Production d'énergie par le solaire thermique</u>	<u>37</u>
I. Présentation du logiciel SOLO 2000	37
II. Configuration du logiciel	37
III. Conclusions	43
<u>C. Production d'énergie électrique par le solaire Photovoltaïque</u>	<u>44</u>

Chapitre III : Conception et dimensionnement du Mobilab

A. Présentation de l'unité d'extraction	45
<hr/>	
B. Chaudière	48
<hr/>	
I. Dimensionnement de la chaudière	48
II. Caractéristiques techniques de la cheminée	50
II.1. Hyper structure de la cheminée	50
II.2. Le foyer	50
II.3. L'avaloir	51
II.4. Le conduit de fumées	51
III. Circuit de vapeur dans la cheminée	52
III.1. Temps de séjour et temps de vaporisation de l'eau dans le ballon	52
<hr/>	
C. Extracteurs.....	53
<hr/>	
D. Condenseur	55
<hr/>	
I. Le condenseur en convection naturelle	55
I.1. La partie désurchauffe	56
I.2. La partie condensation	56
I.3. La partie refroidissement	56
I.4. Calcul de la surface d'échange et de la longueur du tube	56
II. Les aérocondenseurs :.....	57
II.1. Partie simulation	57
II.1.1. Introduction	57
II.1.2. Présentation du logiciel Hysys	58
II.1.3. Simulation de l'aérocondenseur	58
II.2. Calcul de la surface d'échange nécessaire pour condenser la vapeur	64
III.....	Conclusion 67

E. Décanteur 68

I. Comportement du mélange dans le décanteur 68

I.1. Vitesse d'ascension de la gouttelette de quelques huiles essentielles 68

I.2. Forces agissant sur la vitesse d'ascension de la gouttelette d'huile essentielle 69

I.3. Vitesse d'ascension de la gouttelette pour une faible concentration d'huile 69

II. Représentation de la vitesse d'ascension de la gouttelette d'huile essentielle 70

II.1. Régime laminaire 70

II.1.1. Représentation graphique de la vitesse d'ascension en fonction du diamètre des gouttelettes: 71

II.1.2. Interprétation du graphe 71

II.1.3. Corrélations pour les différentes huiles essentielles 71

II.2. Régime intermédiaire 72

II.2.1. Représentation graphique de la vitesse d'ascension en fonction du diamètre des gouttelettes 73

II.2.2. Interprétation de graphe 73

II.2.3. Corrélations pour les différentes huiles essentielles 73

II.3. Régime turbulent 74

II.3.1. Représentation graphique de la vitesse d'ascension en fonction du diamètre des gouttelettes 75

II.3.2. Interprétation du graphe 75

II.3.3. Corrélations pour les différentes huiles essentielles 75

II.4. Résumé 76

III. Représentation de la vitesse d'ascension en fonction de la densité, de la viscosité et du diamètre de la gouttelette 77

III.1. Régime laminaire 77

III.2. Régime intermédiaire 78

IV. Dimensionnement du décanteur 79

F. Pompe..... 80

I. Simulation Hysys de la pompe	80
II. Résultat Hysys pour le dimensionnement de la pompe	82
G. Dimensionnement Photovoltaïque	83
<hr/>	
I. Dimensionnement photovoltaïque pour l'aérocondenseur	83
I.1. Choix du type d'appareil	83
I.2. Sélection de la zone d'utilisation	84
I.3. Contraintes d'utilisation	84
I.4. Résultats	85
I.4.1. Exemple détaillé pour un Mobilab moyen	85
I.4.2. Résultats pour les 3 Mobilab	87
II. Dimensionnement photovoltaïque total	88
III. Comment choisir la bonne batterie	90

Chapitre IV : Etude technico – économique et environnement

A. Définition des éléments du calcul économique.....	91
<hr/>	
I. Les investissements	91
II. Les charges fixes	91
III. Les charges variables	91
IV. Le temps de remboursement	91
B. Détermination des investissements	92
<hr/>	
I. Détermination du prix du Mobilab	92
I.1. Prix d'achat du Mobilab	92
I.2. Prix de pose du Mobilab	92
I.3. Prix du Mobilab	93
II. Détermination du prix de la cheminée	93

III. Détermination du prix des caissons mobiles	94
IV. Détermination du prix de l'aérocondenseur	95
V. Détermination du prix des décanteurs	95
VI. Détermination du prix de l'installation photovoltaïque	96
VII. Détermination du prix de l'instrumentation et de la tuyauterie	96
VIII..... Détermination du Cout total de l'unité	97

C. Comparaison avec une unité classique 97

I. Comparaison des investissements	98
II. Economies d'eau réalisées	98
III. Economies réalisées sur la facture énergétique	99
IV. Bilan des émissions de gaz à effet de serre	100
IV.1. Gaz à effet de serre émis par une unité classique	102
IV.2. Gaz à effet de serre émis par le Mobilab	102

D. Calcul économique 103

I. Marché des huiles essentielles en Algérie	103
II. Estimation du cout opératoire	103
II.1. Les charges variables	103
II.2. Les charges fixes	104
II.2.1. Les charges fixes d'exploitation	104
II.2.2. Les charges fixes de capital	104
II.3. La main d'œuvre	106
III. Les recettes annuelles	106
IV. Le délai de retour sur investissement	107

Conclusion..... 108

Bibliographie 109

Annexes 112

Liste des tableaux

Tableau 1 : Puissance des différents types de chaudières électriques.....	14
Tableau 2 : Puissance et dimensions des différents types de chaudières HH.....	15
Tableau 3 : Consommation en eau en fonction des heures de travail	18
Tableau 4 : Prix d'une installation photovoltaïque en fonction de sa puissance	29
Tableau 5 : Potentiel solaire en Algérie pour différentes régions	30
Tableau 6 : Pouvoir calorifique, teneur en humidité et teneur en cendres de quelques sources de biomasse végétale	33
Tableau 7 : Pourcentage de contribution de la biomasse au recouvrement des besoins de production de vapeur d'eau	36
Tableau 8 : Caractéristiques dimensionnelles et pondérales du capteur unitaire retenu	38
Tableau 9 : Caractéristiques et réglages de l'inclinaison et de l'orientation des panneaux solaires du Mobilab	39
Tableau 10 : Température en fonction des mois de l'année (tecsol)	39
Tableau 11 : Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=100l/Jr	40
Tableau 12 : Taux de couverture solaire obtenu V=100l/j	40
Tableau 13 : Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=200l/Jr	40
Tableau 14 : Taux de couverture solaire obtenu V=200l/j	41
Tableau 15 : Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=400l/Jr	41
Tableau 16 : Taux de couverture solaire obtenu V=400l/j	41
Tableau 17 : Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=800l/Jr	41
Tableau 18 : Taux de couverture solaire obtenu V=800l/j	42
Tableau 19 : Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=1600l/Jr	42
Tableau 20 : Taux de couverture solaire obtenu V=1600l/j	42
Tableau 21 : Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=3200l/Jr	42
Tableau 22 : Taux de couverture solaire obtenu V=3200l/j	43
Tableau 23 : Pourcentage de contribution de l'énergie solaire et de la biomasse au recouvrement des besoins de production de vapeur d'eau	43
Tableau 24 : Dimension d'un container 20 pieds (6.09m)	46
Tableau 25 : Dimension d'un container 30 pieds (9.15m)	46

Tableau 26 : Dimension d'un container 45'pieds (13.7m)	46
Tableau 27 : Débits de vapeur et de matière pour chaque Mobilab	47
Tableau 28 : Caractéristique de la brique réfractaire	50
Tableau 29 : Caractéristiques de la cheminée	51
Tableau 30 : Temps de séjour et temps de vaporisation de l'eau dans le ballon	52
Tableau 31 : Masse volumique de certaines plantes	54
Tableau 32 : Caractéristique d'un caisson mobil	54
Tableau 33 : Nombre de caissons selon le type du Mobilab	55
Tableau 34 : Choix du model thermodynamique en fonction du système.....	59
Tableau 35 : Composition du courant d'Entrée	61
Tableau 36 : Composition du courant de sortie	62
Tableau 37 : Influence du débit d'air sur le coefficient d'échange UA pour un débit de vapeur de 50Kg/h	63
Tableau 38 : Influence du débit d'air sur le coefficient d'échange UA pour un débit de vapeur de 100Kg/h	63
Tableau 39 : Influence du débit d'air sur le coefficient d'échange UA pour un débit de vapeur de 200Kg/h	64
Tableau 40 : Influence de la vitesse de rotation du moteur du ventilateur sur la température de sortie de l'air	64
Tableau 41 : aérocondenseurs, coefficient du film en fonction de la vitesse de l'air	65
Tableau 42 : Paramètres N, l, l', d en fonction des différents débits de vapeur	67
Tableau 43 : Densité et Viscosité de quelques huiles essentielles	68
Tableau 44 : Coefficients de corrélation pour les différentes huiles essentielles, en régime laminaire	72
Tableau 45 : Coefficients de corrélation pour les différentes huiles essentielles, en régime intermédiaire	74
Tableau 46 : Coefficients de corrélation pour les différentes huiles essentielles, en régime turbulent	76
Tableau 47 : Dimensions du vase florentin pour chaque Mobilab	79
Tableau 48 : Quantité d'électricité nécessaire au fonctionnement des ventilateurs pour chaque Mobilab	84
Tableau 49 : Situation du projet	85
Tableau 50 : Production électrique mensuelle	85

Tableau 51 : Dimensionnement Tecsol du champ photovoltaïque.....	86
Tableau 52 : Dimensionnement Tecsol de la batterie.....	86
Tableau53 : Dimensionnement Tecsol de l'onduleur.....	86
Tableau 54 : Dimensionnement Tecsol de l'appoint de secours.....	86
Tableau 55 : Estimation Tecsol du cout de l'installation.....	87
Tableau 56 : Récapitulatif du dimensionnement photovoltaïque Tecsol pour l'aérocondenseur pour les trois Mobilab.....	87
Tableau 57 : Quantité d'électricité nécessaire pour chaque Mobilab.....	88
Tableau 58 : Récapitulatif du dimensionnement photovoltaïque pour les trois Mobilab.....	89
Tableau 59 : Prix d'achat du Mobilab.....	92
Tableau 60 : Prix de pose du Mobilab.....	93
Tableau 61 : Prix de la cheminée.....	94
Tableau 62 : Prix de l'installation caissons mobiles.....	94
Tableau 63 : Prix de l'aérocondenseur.....	95
Tableau 64 : Prix du décanteur.....	96
Tableau 65 : Prix de l'installation photovoltaïque.....	96
Tableau 66 : Prix de l'instrumentation.....	97
Tableau 67 : Prix de la tuyauterie et de l'instrumentation.....	97
Tableau 68 : Cout total de l'unité.....	97
Tableau 69 : Cout d'une unité classique d'extraction d'huiles essentielles.....	98
Tableau 70 : Economies d'eau réalisées par an.....	99
Tableau71 : Économies sur la facture énergétique.....	100
Tableau 72 : Émissions de CO2 et de NOx par source énergétique.....	101
Tableau 73 : Comparatif des émissions de gazes à effet de serre.....	103
Tableau 74 : Durée d'amortissement types de diverses installations.....	105
Tableau 75 : Financement de l'investissement.....	105
Tableau 76 : Calcul des intérêts d'investissement sur Excel.....	105
Tableau 77 : Calcul des frais financiers sur Excel.....	106
Tableau 78 : Salaires par catégorie professionnelle.....	106
Tableau 79 : Résumé du cout opératoire.....	106

Liste des figures

Figure 1: Dispositif d'Hydrodistillation à l'échelle laboratoire	6
Figure 2: Dispositif d'Hydrodistillation à l'échelle industrielle	6
Figure 3: Dispositif de la distillation par entraînement à la vapeur d'eau	7
Figure 4 : Principe de l'entraînement à la vapeur d'eau avec cohobage	8
Figure 5 : Chaudière à tubes de fumées	11
Figure 6: Schéma d'une chaudière à tubes fumées	11
Figure 7: Schéma d'une chaudière à vapeur électrique	13
Figure 8: Alambic artisanal	16
Figure 9: Alambic industriel	16
Figure 10: Alambic à plusieurs plateaux	16
Figure 11: Détermination du prix de base de la virole (pour un récipient sous pression)	17
Figure 12: Vases florentins pour séparation des essences légères et lourdes	19
..... Figure 12-a : Vases florentins pour essences légères	19
..... Figure 12-b : Vases florentins pour essences lourdes	19
Figure 13: Vase florentin pour la séparation des huiles composées	19
Figure 14: Vase florentin pour la séparation des huiles composée de deux fractions	20
Figure 15: Cycle du CO ₂ rejeté par la biomasse	23
Figure 16: Filières de valorisation énergétique de la biomasse	24
Figure 17: Irradiation solaire annuelle moyenne reçue sur le territoire Algérien	31
Figure 18 : Pertes de chaleur en fonction de la température de sortie de gazes brûlées	33
Figure 19 : Evaluation conventionnelle de la perte par les parois	33
Figure 20: Evolution de la chaleur spécifique de l'eau en fonction de la température	34
Figure 21: Evolution de la chaleur spécifique de la vapeur d'eau en fonction de la température	35
Figure 22: Vue de face cheminée en brique	49
Figure 23 : Hyper structure métallique de la cheminée	50
Figure 24 : Dimensions de l'avaloir	51
..... Figure 24-a : Vue de Face	51

Figure 24-b : vue de profil	51
Figure 25 : Circuit de vapeur dans la cheminée	53
Figure 26 : Caissons mobiles	54
Figure 27 : Choix du système d'unité sur Hysys	59
Figure 28 : Choix du model thermodynamique sur Hysys	60
Figure 29 : Choix des composés du procédé sur Hysys	60
Figure 30 : Tableau de composition du courant d'entrée de l'aérocondenseur sur Hysys	61
Figure 31 : Tableau de composition du courant de sortie sur Hysys	62
Figure 32 : Résultat de la simulation de l'aérocondenseur	63
Figure 33 : Courbe de la vitesse de l'air en fonction du coefficient r_a	65
Figure 34 : disposition des ventilateurs de l'aérocondenseur	66
Figure 35 : Schéma du serpentín	67
Figure 36 : Evolution de la vitesse d'ascension d'une gouttelette en fonction de son diamètre pour différentes huiles essentielles, en régime laminaire	71
Figure 37 : Evolution de la vitesse d'ascension d'une gouttelette en fonction de son diamètre pour différentes huiles essentielles, en régime	73
Figure 38 : Evolution de la vitesse d'ascension d'une gouttelette en fonction de son diamètre pour différentes huiles essentielles, en régime turbulent	75
Figure 39 : Evolution de la vitesse en fonction du diamètre de gouttelettes, de la viscosité de l'huile essentielle pour différentes densités en régime laminaire	77
Figure 40 : Evolution de la vitesse en fonction du diamètre de gouttelettes, de la viscosité de l'huile essentielle pour différentes densités en régime intermédiaire	78
Figure 41 : Schéma du vase florentin	80
Figure 41-a : Dimensions du vase florentin	80
Figure 41 -b : Vase florentin	80
Figure 42 : Tableau de composition du courant d'entrée de la pompe sur Hysys	81
Figure 43 : Choix de l'énergie de la pompe sur Hysys	81
Figure 43 : Spécifications dynamiques de la pompe sur Hysys	82

Figure 44 : Fiche technique de la pompe sur Hysys	82
Figure 45 : Dimensions de la pompe	83
Figure 46 : Sélection des contraintes d'utilisation sur Tecsol	85
Figure 47 : Nombre d'années pour l'amortissement de l'investissement photovoltaïque par économie d'énergie	100
Figure 48 : Emissions de CO ₂ par source énergétique	101

Introduction

Introduction

C'est à la préhistoire que remontent les premières activités humaines qui peuvent être qualifiées d'industrielles, qu'elles soient liées à l'agriculture ou à la confection d'objets tels que les outils et armes en pierre. Depuis, l'industrie n'a eu cesse de se développer à travers les âges.

Jusqu'à la fin du 18^{ème} siècle, l'Homme utilisait les ressources que la nature lui offrait pour subvenir à ses besoins. Cependant, la découverte d'énergies telles que le charbon ont profondément bouleversé l'industrie, entraînant une hausse des activités humaines, une expansion considérable de la production, et faisant entrer le monde dans une nouvelle ère.

Grande consommatrice de ressources naturelles ; l'industrie moderne a épuisé une grande partie des réserves d'énergies fossiles disponibles sur la planète. Dans une situation de pénurie annoncée, le prix de ces matières premières augmente sans cesse, ainsi que le taux de pollution résultant de leur utilisation. Les sites industriels interfèrent avec le milieu naturel (occupation de l'espace, perturbation des équilibres physico-chimiques et écologiques, etc.). Ces perturbations cumulées peuvent mener à une crise environnementale.

C'est dans ce contexte que nous nous sommes intéressés à l'industrie des huiles essentielles, industrie polluante, générant des rejets solides et liquides, mais aussi énergivore, étant donné que la plupart des procédés nécessitent beaucoup d'énergie pour le chauffage, la mise en vapeur, la condensation, etc. Les énergies utilisées sont essentiellement d'origines fossiles et non renouvelables (pétrole, gaz, charbon).

Notre objectif est donc d'élaborer une unité d'extraction d'huiles essentielles mobile, et d'y intégrer les énergies renouvelables, ce qui devrait permettre d'appréhender la problématique de la transition entre énergies fossiles et renouvelables. Notre unité devra tenir compte des contraintes techniques, économiques et environnementales, et aura pour objectifs :

- D'être mobile, afin de permettre une adaptation au site.
- D'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 d'huiles essentielles par entraînement à la vapeur.
- D'être énergétiquement autonome.
- D'économiser l'eau, une ressource précieuse.
- D'être moins polluante, en réduisant :
 - Les rejets solides.
 - Les rejets liquides.
 - Les émissions de gaz à effet de serre.
- D'être économiquement viable.

Chapitre I: Généralités

Nomenclature Chapitre I

Nom	Description	Unité
η	viscosité dynamique de l'eau	[Kg/m.s]
ρ	masse volumique de la particule	[Kg/ m ³]
ρ_l	masse volumique du liquide	[Kg/ m ³]
V_p	Vitesse de chute particule	[m/s]
D	Diamètre de l'extracteur	[m]
d	Diamètre de la particule	[m]
e	Epaisseur de la vérole	[mm]
g	accélération de la pesanteur	[m/s ²]
H	Hauteur de l'extracteur	[m]
V	Volume de l'extracteur	[m ³]

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 [1].

D'un point de vue chimique, une huile essentielle est un mélange de molécules variées, principalement des terpènes (hydrocarbures non aromatiques) et des composés oxygénés tels que les alcools les aldéhydes et les cétones [2].

II. Propriété d'une huile essentielle :

II.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 [20].

II. 2. Propriétés physiques :

- Leur densité, proche de celle de l'eau elle varie généralement entre 0,850 et 0,965. La plus dense des huiles essentielles est celle de wintergreen de densité égale à 1,187.
- Étant un élément vivant 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 insolubles dans l'eau dans la plus part du temps.
- Elles sont solubles dans les huiles végétales et dans l'alcool jusqu'à un certain pourcentage.
- Leur Chémotype (familles biochimiques) [20].

II.3. Propriétés chimiques et Chémotype des huiles essentielles :

- Elles sont facilement oxydables en présence de la lumière. Elles se résinifient en absorbant l'oxygène en même temps que leur odeur se modifie, leur point d'ébullition augmente, leur solubilité diminue.
- 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.
- Elles peuvent se combiner avec l'eau pour former des hydrates [19].

Qu'est ce que la Chémotype d'une huile essentielle ?

C'est une classification par rapport au composant chimique majoritaire présent dans l'huile essentielle. Cette classification permet une utilisation plus précise, plus sûre et plus efficace [21].

II.4. Classification biochimique des huiles essentielle :

La plupart des huiles essentielles ont pour composants chimiques et biochimiques les éléments cités ci-dessous avec leurs propriétés [21] :

- Monoterpènes = Stimulants du système immunitaire
- Monoterpénols = Composés anti-infectieux, bactéricides, virucides et fongicides
- Sesquiterpènes= Légèrement hypotenseurs, calmants et anti-inflammatoires
- Sesquiterpénols = Bons toniques et stimulant généraux,
- Phénols = Antiseptique fortement anti-infectieux et immunostimulants
- Diterpénols = Régulateurs hormonaux.
- Aldéhydes = De bons anti-inflammatoires mais rarement utilisés a cause de leur toxicité exemple le formaldéhyde.
- Acides = Sont des hypothermisants et hypotenseurs.
- Cétones = A faible dose elles sont calmantes, sédatives, hypothermisantes. A forte dose ou doses répétées elles sont neurotoxiques, stupéfiantes et épileptisantes.
- Esters = Propriétés antispasmodiques et neurotoniques, excellents rééquilibrant nerveux
- Oxydes = Décongestionnant broncho-pulmonaire: mucolytiques et expectorants.
- Coumarines = Neurosédatives, anticoagulantes.
- Lactones = Agissent en hypothermisants. Elles ont une action mucolytiques plus puissante que les cétones
- Diones = Antispasmodiques et anticoagulantes, moins toxiques que les cétones.

III. Utilisations des huiles essentielles :

L'utilisation des huiles essentielles 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. En effet les huiles essentielles ont de nombreuses propriétés [21] :

- **Désodorisantes, parfumantes :**

En diffusion dans l'atmosphère ou diluées dans les produits de nettoyage, les huiles essentielles désinfectent, désodorisent et parfument agréablement et naturellement l'air que nous respirons [21].

- **Antiseptiques :**

Elles débarrassent l'air ambiant des germes pathogènes, renforcent les défenses immunitaires. Les agrumes sont de remarquables antiseptiques [22].

- **Protectrices :** Certaines huiles essentielles [21] :

- Eloignent les insectes : Girofle, Menthe ;
- Eloignent les moustiques : Citronnelle, et Géranium ;
- Sont d'excellents antimites : Cèdre, Bois de Rose et Patchouli.

- **Antibactériennes :**

De nombreuses huiles essentielles ont une action antibactérienne, toutefois les plus puissantes sont celles qui contiennent des phénols, exemple la lavande [21].

- **Antivirales :**

Les Huiles essentielles ont parfois la capacité de stopper les progressions et les maladies d'origine virale. Il est démontré qu'elles potentialisent le terrain enzymatique du patient afin que celui-ci mette en place ses capacités d'auto-guérison [22].

- **Antidouleurs :**

Les huiles essentielles ont le pouvoir de calmer et atténuer certaines douleurs de faible intensité [21] :

- La douleur vive d'une migraine est anesthésiée par la Menthe poivrée en application locale.
- La douleur dentaire est atténuée par l'application de Girofle sur la gencive.
- Le cyprès calme les crampes musculaires et les rhumatismes
- Le niaouli calme les douleurs en engourdissant les nerfs.

- **Respiratoires :** Dans ce groupe les huiles essentielles [21] :

- Dégagent les voies respiratoires,
- Aident l'organisme à évacuer les mucosités qui l'encombrent,
- Diminuent considérablement l'apparition des crises d'asthme,
- Ont une action antiseptique profonde des voies respiratoires, sinus et cavités pulmonaires,
- Favorisent la fluidification des mucosités et luttent fortement contre la présence de germes pathogènes.

- **Circulatoires :**

Les huiles essentielles de ce groupe peuvent [21] :

- Eliminer les hématomes,
- Etre antiphlébitiques (tonifiant de la circulation sanguine),
- Fluidifier et dissoudre les cellules nécrosées qui entravent la circulation sanguine et gênent le renouvellement cellulaire,
- Activer la circulation sanguine et diminuer la sensation de fatigue dans les jambes,
- Avoir une action remarquable sur la cellulite,
- Agir sur les varices, stopper une hémorragie bénigne par leur action hémostatique.

- **Antifongiques :**

Les huiles essentielles ont un grand pouvoir antifongique aérien et cutané, comme le Citron[21].

- **Digestives :** Certaines huiles essentielles peuvent [21] :

- Empêcher la formation de gaz digestifs, elles sont carminatives,
- Etre apéritives et digestives,
- Stimuler la sécrétion des sucs digestifs,
- Calmer les nausées.

La Menthe poivrée est l'huile essentielle des problèmes digestifs, elle est efficace pour calmer la constipation, les brûlures d'estomac, l'indigestion et la flatulence.

- **Propriétés métaboliques :** Dans ce groupe on trouve des huiles essentielles [21] :
 - Toniques ou calmantes,
 - Antispasmodiques,
 - Neurotoniques,
 - Régulatrices de la fonction thyroïdienne,
 - A effet hypotenseur ou hypertenseur,
 - Stimulantes de la zone rénale,
 - Limitant la production d'histamine en cas d'allergies,
 - Régulatrices du rythme cardiaque,
 - Equilibrantes de l'appareil féminin.

IV. 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 ont la faculté de ronger le plastique c'est pour ça les flacons doivent être stockés en position verticale afin de protéger le bouchon [23].

B. Procèdes d'extraction des huiles essentielles

Afin d'extraire une huile essentielle d'une plante, plusieurs méthodes s'offrent à nous pour y parvenir, à savoir l'Hydrodistillation, l'entraînement à la vapeur d'eau, l'Hydrodiffusion, l'extraction par solvant, l'extraction par expression, l'extraction par enfleurage, l'extraction par CO₂ liquide.

I. Hydrodistillation :

Les changements d'état sont largement utilisés dans toutes les étapes de séparation et de purification. La distillation, et plus particulièrement l'Hydrodistillation, est une technique basée sur le changement d'état liquide - vapeur des espèces chimiques.

La technique d'Hydrodistillation permet d'obtenir, à partir d'un mélange complexe, le composé organique souhaité par simple séparation de phases dès lors que ce dernier est non miscible à l'eau.

Il suffit de porter à ébullition le mélange dans un ballon de distillation, puis à condenser les vapeurs qui se dégagent dans un réfrigérant, c'est-à-dire de les ramener à l'état liquide, afin de séparer les deux phases liquides dans un décanteur et de récupérer les arômes [3].

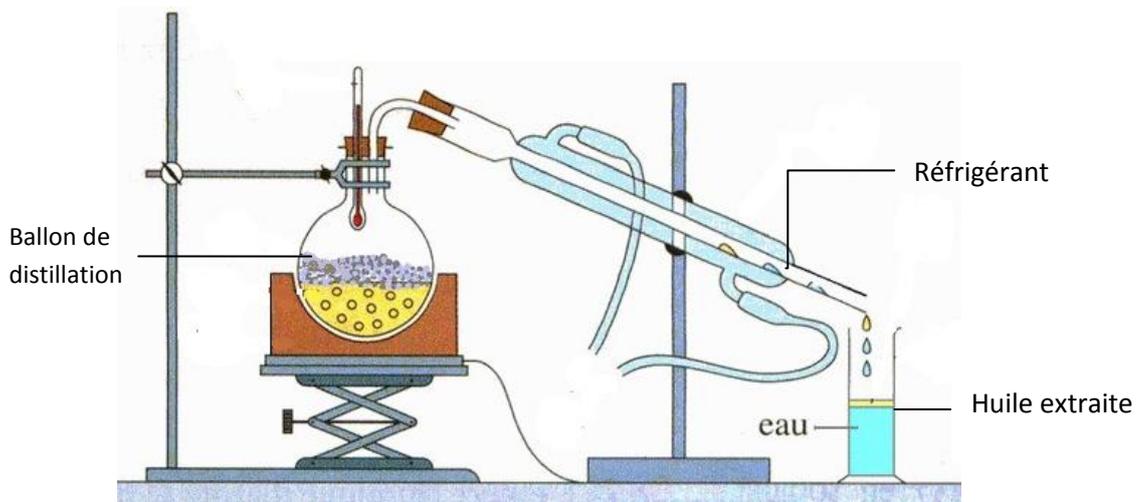


Figure 1 : Dispositif d'Hydrodistillation à l'échelle laboratoire [24]

L'avantage principal de cette méthode par rapport à une distillation fractionnée tient aux températures utilisées : l'hétéro azéotrope est distillé à des températures, toujours inférieures à 100 °C, alors que les températures d'ébullition de nombreux composés organiques sont nettement supérieures à cette valeur. Ceci explique que cette technique est très largement utilisée en parfumerie, où les molécules odorantes sont souvent fragiles et ne peuvent supporter des températures importantes [3].

À grande échelle on utilise généralement un alambic où la matière végétale est placée avec de l'eau bouillante, cet alambic est surmonté d'un chapiteau hermétiquement fermé puis d'un col de cygne qui sert à faire passer la vapeur contenant l'arôme dans un serpentin plongeant dans un réfrigérant (figure2) [18].

Les vapeurs qui arrivent dans le serpentin se condensent donnant ainsi un mélange de liquide bi-phasique contenant une phase organique : l'extrait et une phase aqueuse : l'eau, ce liquide est récupéré dans un décanteur où l'huile essentielle sera séparée de l'eau [18].

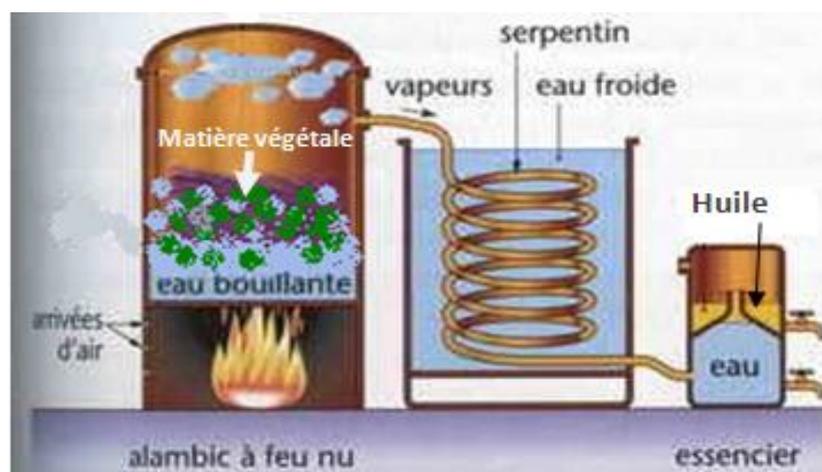


Figure 2 : Dispositif d'Hydrodistillation à l'échelle industrielle [24]

Cette méthode est très simple à réaliser et les investissements sont peu coûteux mais elle présente certains inconvénients tels que les dégradations dues à l'eau qui provoque l'hydrolyse des esters, particulièrement si l'eau n'est pas assez chaude avant l'immersion de la matière végétale [3].

II. Distillation par entraînement à la vapeur d'eau et cohobage:

C'est une variante de la distillation, en effet elle consiste à apporter de la vapeur d'eau de l'extérieur et non pas à chauffer le ballon contenant les composés à récupérer.

Dans la cuve d'un alambic munit d'un tamis au fond pour que les végétaux ne soient pas en contact direct avec l'eau, 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 essences sont plus légères que l'eau et elles sont récupérées dans la partie supérieure du séparateur, appelé aussi essencier ou vase florentin [25].

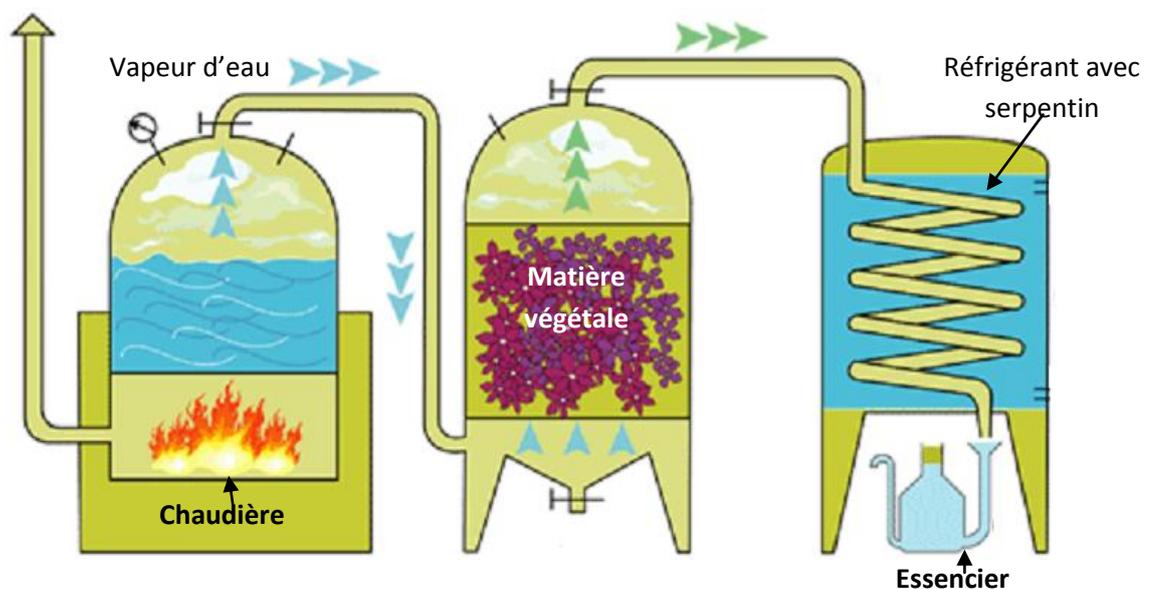


Figure 3: Dispositif de la distillation par entraînement à la vapeur d'eau [25]

L'eau florale, ou la phase aqueuse obtenue, peut, au lieu d'être directement récupérée, être réinjectée dans la chaudière, c'est ce que l'on appelle le cohobage. On récupère ainsi une partie de l'huile en solution, le coefficient de solubilité ne pouvant être dépassé. Ceci est d'autant plus important que le rendement en huile essentielle est faible et le prix revient élevé -c'est le cas de la rose- ou bien que la solubilité est importante c'est le cas des graines de coriandre. Pour la rose on retire seulement 25% d'huile essentielle en distillation directe et 75% supplémentaire par cohobation [4].

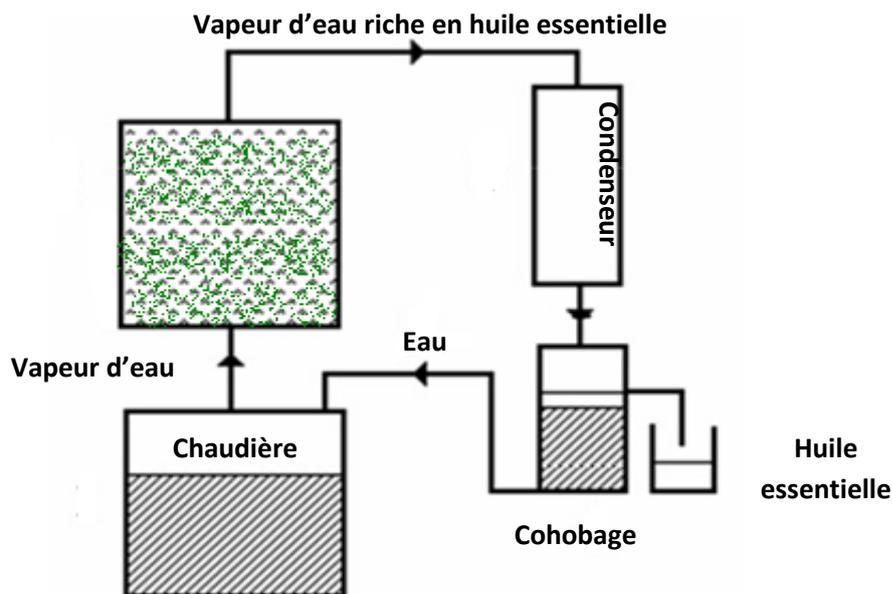


Figure 4 : Principe de l'entraînement à la vapeur d'eau avec cohobage [4]

III. Enfleurage :

La technique de l'enfleurage ou macération à saturation est une des techniques les plus anciennes, utilisée dans le cas où l'arôme des plantes est trop fragile pour supporter la chaleur d'une distillation. En effet cette méthode d'extraction consiste à étendre une couche de ces substances végétales fragiles entre deux couches épaisses de matière grasse [25].

On renouvelle les matières végétales fraîches jusqu'à saturation de la graisse en fragrance. On débarrasse alors le parfum de l'excédent graisseux et l'on obtient une essence absolue, une huile essentielle de très haute qualité olfactive.

Cette technique est la seule qui permette de restituer au mieux la fragrance de la plante fraîche mais de nos jours elle n'est presque plus utilisée [25].

IV. Extraction aux solvants volatils :

Dans un solvant organique non miscible avec l'eau on fait dissoudre le composé recherché et on sépare la phase organique contenant le composé à extraire de la phase aqueuse. Cette technique fait intervenir trois étapes. Tout d'abord il faut assurer un contact du solvant avec la substance contenant le composé à extraire dans un réacteur bien adapté à savoir un ballon. Puis on fait passer le mélange ainsi obtenu dans un décanteur afin de séparer l'eau l'extrait et le solvant utilisé [18].

En outre le choix du solvant est très important. Il obéit à quatre critères et nécessite la connaissance d'un paramètre physique caractéristique de ce solvant à savoir [18] :

-État physique du solvant : Le solvant doit être liquide à la température et à la pression où l'on réalise l'extraction.

-Miscibilité du solvant : Le solvant doit être non miscible avec la phase qui contient initialement le composé à extraire.

-Solubilité : Le composé à extraire doit être très soluble dans le solvant. C'est à dire, beaucoup plus soluble dans le solvant que dans le milieu où il se trouvait initialement (milieu aqueux en général).

-Densité du solvant : Il est nécessaire de connaître ce paramètre car c'est lui qui détermine si la phase organique, contenant le composé à extraire, se trouve au dessus ou en dessous de la phase aqueuse (à éliminer) dans l'ampoule à décanter.

V. L'expression

Cette méthode est réservée uniquement aux écorces d'agrumes à savoir le citron l'orange la mandarine et tous les fruits de cette même famille. Elle consiste à presser à froid ces plantes.

En effet Les poches sécrétrices du zeste de l'agrumes sont brisées mécaniquement par pression à froid ce qui permet d'en recueillir l'essence. Pour les agrumes on parle en effet d'essence et pas d'huile essentielle qui provient de la distillation [19].

VI. 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 sont légèrement différents de ceux obtenus par entraînement à la vapeur d'eau [3].

VII. Extraction par CO₂ Supercritique :

Cette méthode consiste à utiliser le CO₂ dans un état particulier : un état supercritique. Pour arriver à son point supercritique, le CO₂ subit des transformations grâce à des conditions de température et de pression particulières, que l'on fait varier en fonction du résultat que l'on veut obtenir.

L'état supercritique est intéressant car il facilite la pénétration au cœur des cellules pour en extraire les molécules qui vont ensuite se dissoudre dans l'eau de la cellule. Puis, la vapeur empreinte de ces molécules va s'échapper du corps cellulaire. Ensuite, il suffit de modifier les conditions de pression et de température pour transformer l'état supercritique en gaz et le récupérer chargé des molécules.

L'extraction au CO₂ supercritique permet d'extraire les principes actifs à température tout à fait modérée (environ 30°C). De plus, on peut agir sur les conditions de pression pour choisir d'extraire uniquement les composés huileux volatiles (extraction sélective) par moindre pression ou bien l'intégralité des principes actifs par forte pression. Enfin, l'extrait obtenu est pur, c'est à dire qu'il ne contient plus aucune trace de solvant, pesticide et autre produit chimique que la plante a pu rencontrer au cours de son existence [31].

C. Unité Classique d'extraction d'huiles essentielles

Cette partie traite des différents composants d'une unité d'extraction d'huiles essentielles classique à savoir les chaudières, les extracteurs, les condenseurs et les décanteurs.

I. Chaudière :

La Chaudière est un dispositif qui permet de chauffer l'eau et de produire de la vapeur. Si l'eau est chauffée au-delà de la pression atmosphérique on parle alors de vapeur surchauffée. Toutes les chaudières se composent de deux compartiments distincts : l'un dans lequel brûle le combustible le foyer et un autre dans lequel l'eau est chauffée [5].

I.1. Classification des chaudières en fonction de leur technologie :

I.1.1. Chaudières à tubes de fumées :

C'est historiquement le premier type de construction, ce fut l'inventeur américain Oliver Evans en 1800 qui construisit un moteur à vapeur à haute pression utilisant un précurseur de la chaudière à tubes de fumée.

La chaudière est entièrement remplie d'eau. Le brûleur pulvérise le combustible qui s'enflamme et chauffe l'eau. La fumée monte et, passant dans une série de tubes immergés dans l'eau, évapore cette dernière. La fumée est évacuée par une cheminée.

En effet la flamme et les fumées qui résultent de la combustion circulent du brûleur jusqu'à la cheminée dans un faisceau de tubes immergés dans une calandre formant le réservoir d'eau.

La circulation des fumées est en plusieurs passes, la première passe étant généralement constituée d'un seul tube de gros diamètre.

Ces chaudières peuvent être équipées d'un ou de plusieurs brûleurs.

Elles produisent généralement de la vapeur saturante, directement issue de l'ébullition dans le réservoir d'eau [30].

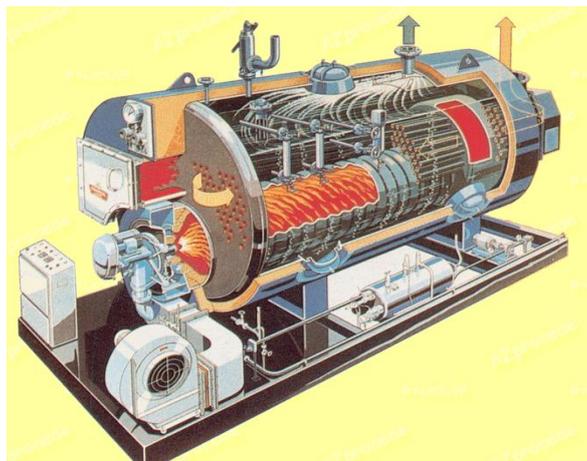


Figure 5 : Chaudière à tubes de fumées [27]

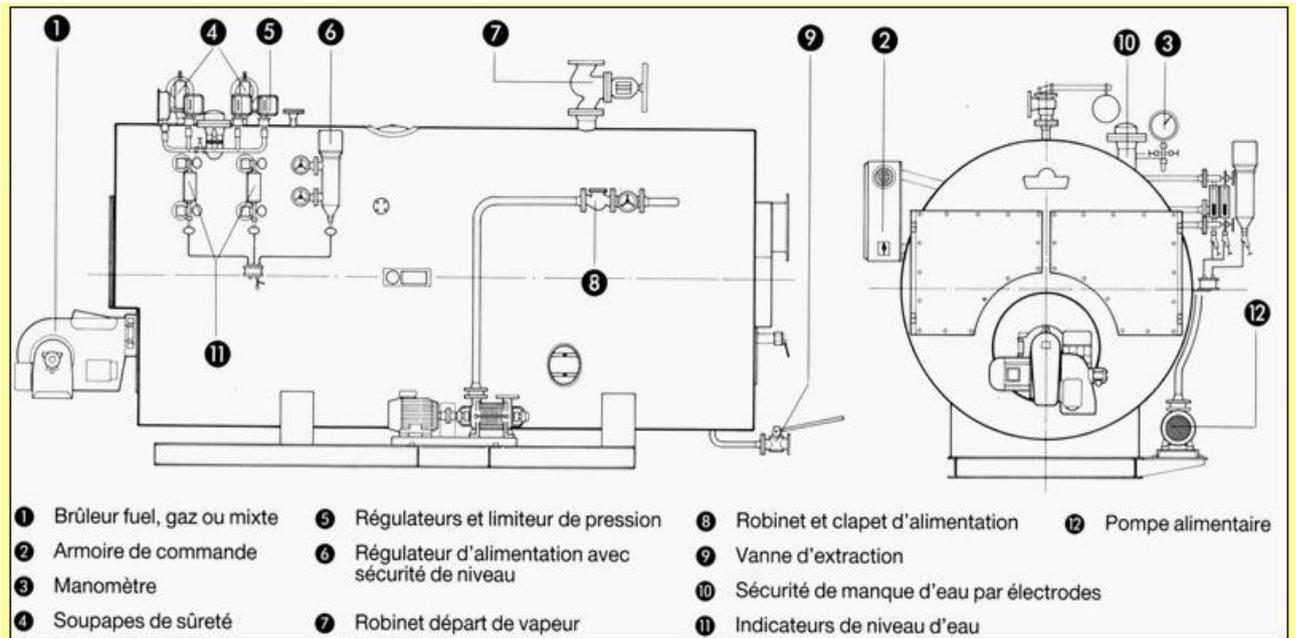


Figure 6: Schéma d'une chaudière à tubes fumés [27]

Les chaudières à tubes de fumées ont cependant une capacité et une pression limitée et présentaient parfois des risques d'explosion suite à la rupture du tube foyer, offrant alors à toute l'eau de la chaudière un accès direct à la partie la plus chaude du circuit de fumées : il y a à ce moment vaporisation instantanée d'une grande quantité d'eau, d'où une forte surpression et souvent une explosion.

Ces accidents sont évités actuellement, essentiellement grâce à une meilleure technologie de construction (des tubes foyer ondulés), aux progrès du traitement de l'eau, aux contrôles systématiques et à l'entretien en cours d'exploitation [5].

I.1.2. Chaudière à tube d'eau :

Dans la chaudière à tubes d'eau, l'eau passe à travers des tubes chauffés depuis l'extérieur par les gaz de combustion et la vapeur est collectée dans un tambour supérieur. Cette disposition utilise à la fois la chaleur de convection des gaz et la chaleur radiale du feu et des parois de la chaudière. La chaudière à tubes d'eau trouve de larges applications, grâce à des progrès tels que les alliages d'acier à haute température et les techniques de soudages modernes, qui font d'elle le type de chaudière standard pour toutes les chaudières de grosse capacité.

Les chaudières à tubes d'eau modernes peuvent fonctionner à de très hautes pressions et produisent plus de 4500 tonnes de vapeur par heure. Les températures de combustion pouvant dépasser 1 650 °C, le débit d'eau est commandé par une circulation naturelle ou forcée. Grâce à ce que l'on appelle des surchauffeurs [30]

Elles sont aussi réputées « inexplosibles » parce qu'une éventuelle rupture d'un tube de petit diamètre n'entraîne généralement pas d'accident grave, mais seulement un passage intempêtif de vapeur dans le circuit fumées par un orifice de faible dimension.

Parmi les chaudières à tubes d'eau on trouve [5] :

- les petites chaudières à vaporisation instantanée ;
- les petites chaudières à tubes borgnes de type Field et dérivées ;
- les chaudières à tubes inclinés ou verticaux.

I.1.3. Chaudières électriques :

Les chaudières électriques les plus courantes sont les petites chaudières à thermoplongeur dont la puissance varie de quelques dizaines de kilowatts à 8000 kW au maximum. Le réglage se fait par le nombre de résistances alimentées en courant basse tension.

Ces chaudières peuvent opérer sous une pression pouvant atteindre 100 bars, mais le plus souvent dans l'industrie la pression de travail se situe entre 10 et 15 bar.

Une variante intéressante des chaudières électriques est les chaudières électriques à électrodes qui, alimentées en courant triphasé moyenne tension, de 3 à 20 kV, permettent actuellement de couvrir la gamme de puissance de 1 à 70 MW.

Il existe aussi des chaudières à tubes chauffants en acier inoxydable, disposés en parallèle, dont la paroi est parcourue par un courant basse tension sous une forte intensité.

D'une façon générale, les chaudières électriques offrent une grande souplesse de marche, une grande rapidité de mise en température et une facilité d'exploitation exceptionnelle. Les parties sous pression d'eau et de vapeur sont compactes et de conception beaucoup plus simple que pour les chaudières classiques, mais elles nécessitent l'adjonction d'un équipement électrique en moyenne tension spécifique et sophistiqué, qui double approximativement l'investissement [5].

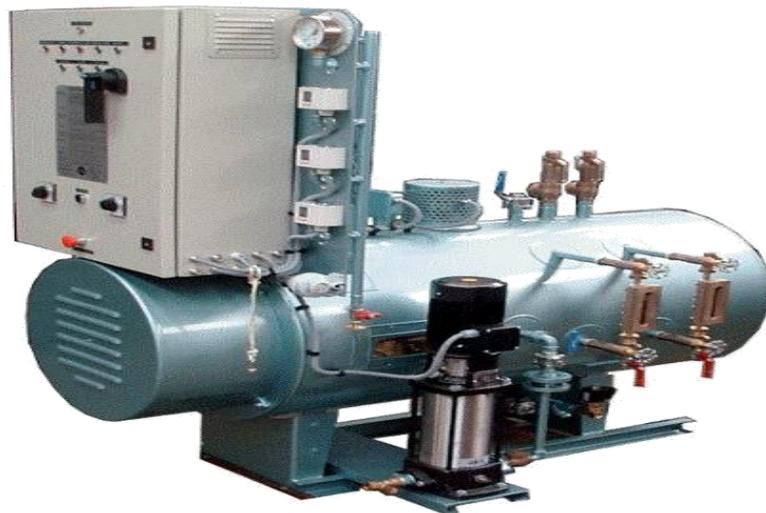


Figure 7: Schéma d'une chaudière à vapeur électrique [28]

I.2. Classification des chaudières en fonction de leur rendement [5]:

I.2.1. Chaudières à basse température et à condensation :

Cette nouvelle génération de chaudières permet d'obtenir des rendements très élevés. Il faut cependant tenir compte de l'investissement de départ et des possibles adaptations de la cheminée.

I.2.2. Chaudières au fioul et électro-fioul :

Ce sont des chaudières en fonte sectionnées, réservées aux moyennes puissances (jusqu'à 1300 kW).

Les chaudières de grande puissance (jusqu'à 5800 kW) sont généralement des chaudières sectionnées en acier, ou des chaudières à tubes de fumées verticaux ou horizontaux. Dans ce type de chaudières, les fumées effectuent un parcours dans des tubes qui servent de récupérateur et où elles perdent leur chaleur résiduelle.

Elles sont conçues pour fonctionner à l'électricité pendant les périodes où la tarification est avantageuse et au fioul pendant les périodes où l'électricité est chère.

I.2.3. Les chaudières au gaz et à condensation

Les chaudières à condensation ont un rendement de 20% supérieur à celui des chaudières classiques.

I.2.4. Chaudières à haute performance :

Ce sont des chaudières combinées à poly combustibles.

I.3. Classification en fonction de leurs combustibles [5]:

Il est possible de transformer des chaudières utilisant un combustible en chaudière utilisant un autre combustible.

Aujourd'hui, certains constructeurs proposent des chaudières pouvant utiliser plusieurs combustibles avec très peu de transformations.

I.3.1. Chaudières à foyer unique

Ces chaudières permettent de passer facilement d'un combustible liquide à un combustible solide.

I.3.2. Les chaudières à double foyer

Ce type de chaudière permet de passer instantanément d'un combustible à un autre. Ces chaudières ont un rendement qui atteint 90 et 95 %. Par rapport aux anciennes chaudières et pour un même investissement, elles permettent une économie de l'ordre de 20%.

I.3.3. Les chaudières duo

Ces chaudières sont constituées par la juxtaposition d'une chaudière fioul et d'une chaudière électrique; on utilise cette solution quand on a une chaudière existante en bonne état.

I.3.4. Les chaudières compactes

Ces chaudières sont constituées par deux corps de chauffe, l'un fioul, l'autre électrique à l'intérieur d'une même carrosserie.

I.4. Consommation des différentes chaudières:

I.4.1. Chaudières électriques :

On prendra pour exemple les chaudières de type EH de puissance qui varie de 50 à 600 KW pour des débits de vapeur allant jusqu'à 800 kg/heure, résumées dans le tableau qui suit [28] :

Tableau 1 : Puissance des différents types de chaudières électriques [28]

Type chaudière	Production de vapeur en kg/heure	Puissance en KW
EH 50 KW	65 / 70	50
EH 75 KW	100 / 105	75
EH 150 KW	200 / 210	150
EH 301 KW	400 / 420	301
EH 602 KW	800 / 840	602

I.4.2. Chaudières au fioul gasoil et gaz naturel:

On prendra pour exemple les chaudières de type HH de puissance qui varie de 300 à 1400 KW pour des débits de vapeur allant jusqu'à 2000 kg/heure, résumées dans le tableau qui suit [29]:

Tableau 2 : Puissance et dimensions des différents types de chaudières HH [29]

Production de vapeur	kg/h		500	750	1000	1250	1500	1750	2000
Puissance thermique utile	KW		348	522	696	750	1045	1219	1393
Consommation carburant	Gasoil (l/h)		37	55	74	92	111	129	148
	Fuel-oil (l/h)		34	51	68	85	103	120	137
	Gaz naturel (L/h)		36	54	72	90	108	126	144
Poids transport	Tonne		2,1	2,7	3,1	4,5	5,5	6,5	7,3
Dimensions	A	mm.	2250	2550	2850	2850	3250	3850	3400
	B	mm.	1750	1750	1750	2000	2000	2000	2400
	C	mm.	1800	1800	1800	2000	2000	2000	2470
	D	mm.	250	250	300	350	350	400	400
	E	mm.	1350	1350	1350	1600	1600	1600	2000

I.5. Prix d'une chaudière :

I.5.1. Chaudières électriques :

Pour une chaudière électrique qui produit un débit de vapeur de 100 kg/h avec puissance de 75 KW le prix peut aller jusqu'à 1800 £ soit 180 000 DA [28].

I.5.2. Chaudières au fioul:

Pour une chaudière au fioul qui produit un débit de vapeur de 100 kg/h, le prix peut aller jusqu'à 2500 £ soit 250 000 DA [29].

II. Extracteur ou alambic :

II.1. Description :

Dans une unité classique d'extraction d'huiles essentielles, l'extracteur le plus communément utilisé est l'alambic. Il s'agit d'un réservoir cylindrique légèrement conique pour faciliter l'application de l'appui de la grille, il se termine, à sa partie supérieure, par un chapiteau tronc conique muni d'un col de cygne (tube légèrement recourbé descendant avec une faible pente vers le condenseur) et à sa partie inférieure, par une calotte hémisphérique munie en son centre, d'un robinet de purge permettant l'évacuation des eaux de condensation.

Pour l'hydro-distillation, étant donné que l'eau est en contact direct avec la charge, ce dispositif simple est suffisant.

Pour l'entraînement à la vapeur d'eau, la grille est insérée suffisamment loin au-dessus du fond de l'alambic, de sorte que l'eau bouillante et la matière végétale, soutenue par la grille, ne soient pas en contact direct, pour permettre l'accumulation des eaux de condensation au fond sans entrer en contact avec la vapeur ascendante. Dans ce cas, et afin d'assurer un bon contact entre la vapeur d'eau et la charge végétale, la vapeur devra être distribuée de façon convenable dans l'alambic.

A cet effet, il est préconisé une conduite enroulée en spirale et perforée de petits trous dont le diamètre n'excédera pas celui de la conduite, afin que la vapeur ne puisse pas uniquement s'échapper des premiers trous [6].



Figure 8: Alambic artisanal [31]



Figure 9: Alambic industriel [31]

Si des charges au-dessus de 100 Kg doivent être distillées, il sera commode de répartir la charge sur plusieurs plateaux afin d'empêcher le tassement, assurer une meilleure distribution de vapeur, et faciliter le déchargement.

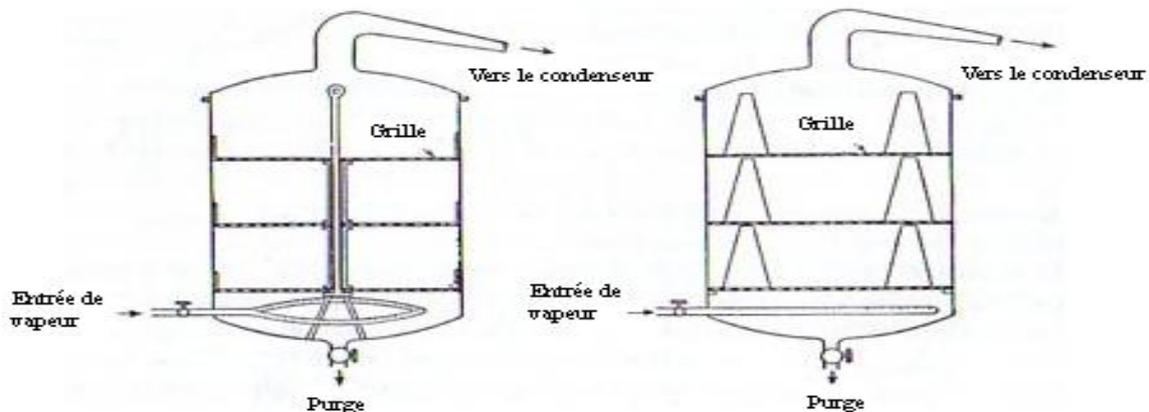


Figure 10: Alambic à plusieurs plateaux [27]

II.2. Prix d'un alambic classique :

Afin d'évaluer le coût d'un alambic dans une unité classique d'extraction d'huiles essentielles ayant la même capacité que la notre, nous prendrons comme référence l'alambic utilisé dans le cadre du projet de fin d'études «*Potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans une unité d'extraction d'huiles essentielles*», présenté par Milles Amrani Rym et Basta Amira, puisqu'il s'agissait d'un alambic aux dimensions adéquates pour un Mobilab.

Pour pouvoir calculer le prix de l'extracteur de notre installation, on assimilera l'extracteur à un ballon de diamètre $D= 1.10$ m; de hauteur $H= 1.90$ m; de volume $V=1.80$ m³, et de virole d'acier ordinaire d'épaisseur $e = 8$ mm. Les calculs utilisés pour l'estimation du prix repose sur la méthode de pré estime proposée par le manuel d'évaluation économique des procédés [16].

La méthode de pré-estime comporte une démarche relative au pré dimensionnement des appareils, notamment à l'aide de graphiques, en calculant un prix de base, supposent que soient connues ou déterminées par ailleurs leur caractéristiques dimensionnelles principales (diamètre, hauteur, surface, puissance,...). Ainsi, nous aurons [7] :

Prix de l'alambic (pour l'année 2000) = prix de base de la virole * Poids virole

On doit donc déterminer le prix de base de la virole et son poids, afin d'évaluer le prix de l'alambic.

Détermination du poids de la virole :

On utilise l'expression suivante : $\text{Poids virole (kg)} = 24.7 \times D \times H \times e$

Poids virole = 413 Kg

Etablissement du prix de base de la virole :

Ce prix en Euro/kg pour l'année 2000, est établi à partir de la courbe de la figure 11 en fonction du diamètre (mm) de la virole, pour une épaisseur de 8 mm et pour de l'acier ordinaire [5].

À partir de la Figue, pour $D = 1,10$ m, $e = 8$ mm, on obtient :

Prix de base de la virole (pour l'année 2000) = 3.875 Euro/kg = 387.5 DA/kg.

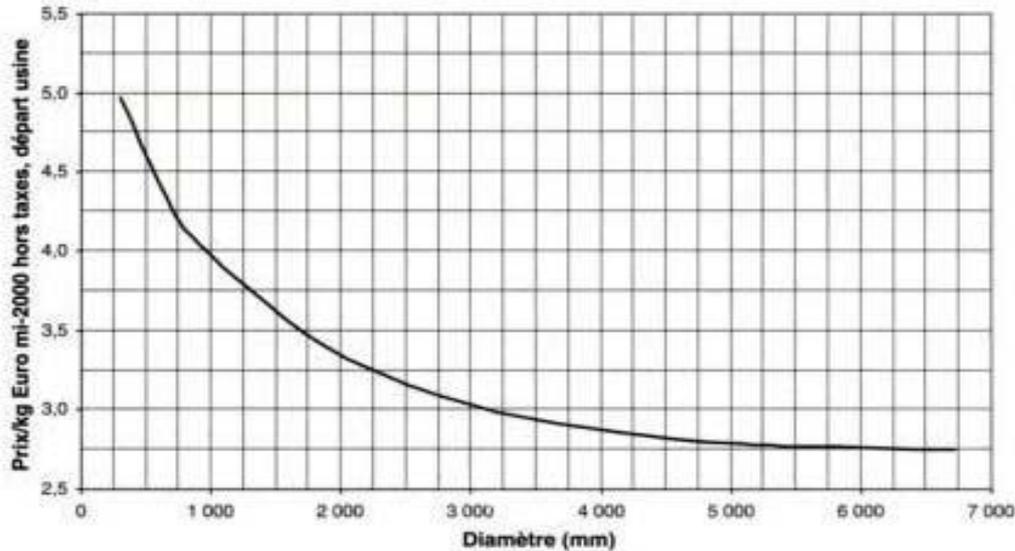


Figure 11: Détermination du prix de base de la virole (récipient sous pression) [7].

Prix de l'alambic (pour l'année 2000) = prix de base de la virole \times Poids virole

Prix de l'alambic (pour l'année 2000) = $3,875 \times 413 = 1601$ Euro = 160 100 DA

On suppose une augmentation du coût d'une installation à environs 3% par an, ce qui reviendrait à une augmentation de 27% de 2000 à 2009 [7].

Prix de l'Alambic = 200 000 DA

III. Condenseur :

III.1. Description :

Un échangeur de chaleur est un dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre, sans les mélanger. Le flux thermique traverse la surface d'échange qui sépare les fluides. En industrie, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel pour la maîtrise de l'énergie. Une grande part de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, que ce soit pour les besoins du procédé, ou pour récupérer de la chaleur.

Il existe différents types d'échangeurs de chaleur : les échangeurs tubulaires et les échangeurs à plaques, si le critère de classement est technologiques ; métalliques et non métalliques si le critère est la nature du matériau de la paroi d'échange ; et pour le classement fonctionnel, on a :

- Les deux fluides ont un écoulement monophasique ;
- Un seul fluide à un écoulement avec changement de phase (évaporateurs ou condenseurs) ;
- les deux fluides ont un écoulement avec changement de phase (évapo-condenseurs).

Le condenseur est un échangeur de chaleur ayant pour but de refroidir et de condenser une vapeur à l'aide d'un fluide réfrigérant. Il y a donc changement de phase pour l'un des fluides en circulation.

La condensation d'un mélange de vapeurs se produit dans de nombreuses installations industrielles qui couvrent des domaines d'application aussi divers que le génie chimique, la production de chaleur, et la production de froid. Un condenseur nécessite un liquide de refroidissement abondant et bon marché. Pour cela, on utilise principalement l'eau et parfois l'air [14].

III.2. Les condenseurs à eau :

Ce type de condenseurs est le plus classique de tous. Ils sont généralement tubulaires, métalliques. L'eau est le fluide réfrigérant, et s'écoule dans un serpentin. Selon les normes usuellement admises, un bon condenseur permet de recueillir un distillat dont la température avoisine les 30°C, tandis que l'eau de refroidissement ne doit pas excéder une température de 80°C à sa sortie [14].

III.3. Consommation en eau :

Pour le calcul de la consommation en eau d'un condenseur à eau pour notre unité d'extraction, 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 [16].

Tableau 3 : Consommation en eau en fonction des heures de travail [16]

Nombre d'heures de travail par jour	4	8
Débit (l/mois)	186000	372000
Débit (l/an)	2 263000	4 526000

III.4. Prix d'un condenseur à eau :

Les prix budget pour un condenseur à eau tubulaire allant de 2m² à 4m² varient entre 300 000 DA et 550 000 DA [32].

IV.

Décanteur (essencier ou vase

florentin) :

IV.1. Description :

Une partie principale de l'équipement d'extraction des huiles essentielles est le décanteur, voir essencier, qui permet le recueil du condensât et la séparation de l'extrait des eaux de condensation.

La séparation des deux produits finis de l'extraction, à savoir l'huile essentielle et l'hydrolat, se fait avec ce que nous appelons un vase florentin. Il existe pas mal de variations et appareils, mais le principe est basé sur la différence de densité entre l'eau de condensation et l'huile essentielle qui ne se mélangent pas dans l'eau, elle y flotte dans le cas où sa densité est inférieure à celle de l'eau ou alors se dépose sur le fond quand sa densité dépasse celle de l'eau [6].

De ce fait on dispose de deux types de vase florentin. Des vases florentins pour les essences légères (figure 12.a) et les vases florentins pour les essences lourdes (figure 12.b)

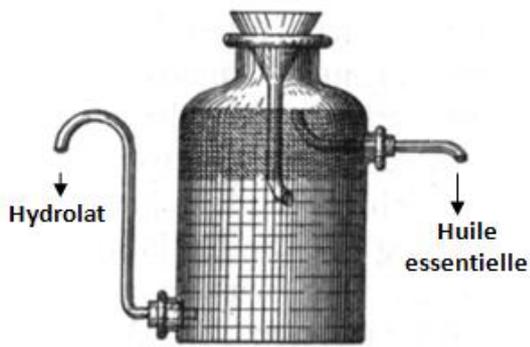


Figure a : vase florentin pour essences légères



Figure b : vase florentin pour essences lourdes

Figure 12 : Vases florentins pour séparation des essences légères et lourdes [33]

Pour les huiles essentielles composées, c'est-à-dire des huiles essentielles composées d'huiles légères et d'huiles lourdes on fait appel à d'autres types de vases florentin outre que ceux cités précédemment.

Le dispositif qui suit (figure 13) montre un décanteur partagé en deux compartiments par une cloison qui se termine près du bas du récipient.

Le distillat s'écoule dans la première chambre, les huiles les plus légères que l'eau sont recueillies dans la plus haute partie de la première chambre alors que les huiles plus lourdes que l'eau se trouvent en bas du récipient et les eaux de décantation sont évacuées au moyen d'une vanne dans la deuxième chambre [6].

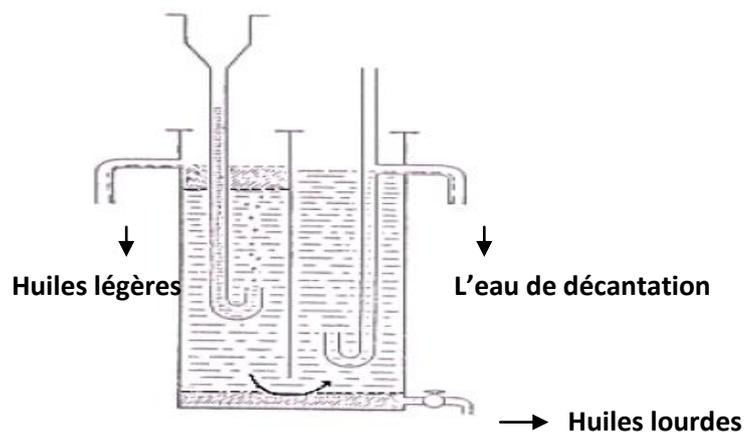


Figure 13: Vase florentin pour la séparation des huiles composées [6]

Un autre type de vase florentin (figure 14) qui offre l'avantage de combiner plusieurs dispositifs dans une unité simple. Constitué d'une seule chambre et plusieurs orifices qui permettent le recueil des huiles lourdes, des huiles légères et l'évacuation de l'eau de décantation.

Pour des huiles plus légères que l'eau, l'huile est évacuée en A ; les robinets B, C, et D sont fermés, et l'eau est évacuée en E

Pour des huiles plus lourdes que l'eau, l'huile est en B; les robinets A, D, et E sont fermés; et l'eau est évacuée en C [6].

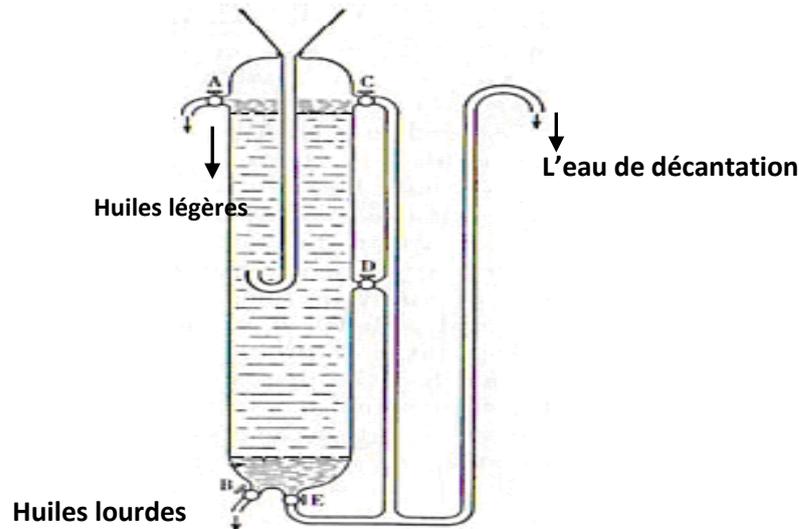


Figure 14: Vase florentin pour la séparation des huiles composée de deux fractions [6]

IV.2. Matériau utilisé :

On peut avoir des vases florentins en verre pour les faibles capacités n'excédant pas 15 litres. Pour de plus grandes capacités les vases sont généralement en fer galvanisé, en aluminium, en cuivre, en cuivre étamé ou en acier inoxydable.

L'utilisation des tubes ou des bouchons en caoutchouc est déconseillée, car le caoutchouc étant partiellement soluble dans l'huile essentielle peut provoquer une modification dans la nature de cette dernière [26].

IV.3. Phénomènes physiques dans un essencier :

IV.3.1. La décantation :

La décantation est une opération de séparation mécanique, sous l'action de la gravitation, et par différence de densité de plusieurs phases non-miscibles dont l'une au moins est liquide. Plus exactement La décantation est une technique de séparation des matières en suspension et des colloïdes rassemblés en floc, après l'étape de coagulation-floculation.

La vitesse de décantation ou vitesse de chute des particules est proportionnelle au diamètre, à la masse volumique et à l'accélération de la pesanteur tandis qu'elle est inversement proportionnelle à la viscosité dynamique du liquide selon l'équation de stokes [34].

$$V_p = \frac{g \cdot (\rho_p - \rho) \cdot d^2}{18\eta}$$

g: accélération de la pesanteur,

ρ_l : masse volumique du liquide.

ρ : masse volumique de la particule.

η ; viscosité dynamique de l'eau.

d : diamètre de la particule.

IV.3.2. La coalescence :

La coalescence est un phénomène où deux substances identiques, mais dispersées, ont tendance à se réunir. Dans le vase florentin, les petites gouttes d'huile fusionnent entre elles progressivement jusqu'à ne former qu'une seule grande goutte traduisant la séparation finale entre l'huile et l'eau.

En un mot, la coalescence est la fusion d'agrégats dispersés en gouttelettes de plus grande taille [35].

D. Les énergies renouvelables

I. Sources d'énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables sont des énergies propres, n'émettant que très peu ou pas de gaz à effet de serre, et dont l'origine ne s'épuise pas, d'où l'appellation « renouvelables ».

L'Homme les emploie comme sources d'énergie depuis des millénaires, comme l'utilisation du soleil pour se chauffer, et du vent pour faire avancer un voilier ou faire tourner un moulin. Elles apparaissent maintenant comme un complément évident aux énergies fossiles, pour la production d'énergie thermique ou électrique. Parmi les énergies renouvelables les plus utilisées, on peut citer [15]:

I.1. L'énergie éolienne :

L'utilisation de la force du vent par l'homme remonte à l'antiquité. En effet, c'est grâce à cette force que les bateaux à voile peuvent avancer, ainsi que les moulins à vent produisent de l'énergie mécanique. Le moulin à vent est l'ancêtre de l'éolienne. Une éolienne est une machine qui capte l'énergie cinétique du vent et la transforme en électricité.

I.2. L'énergie hydraulique :

L'énergie de l'eau est utilisée depuis déjà longtemps. C'est elle qui fait avancer voiliers et barques, mais aussi les moulins à eau. Aujourd'hui, c'est une des énergies primaires les plus utilisées pour la production d'électricité. L'énergie de l'eau ou énergie hydraulique est majoritairement produite par le déplacement ou l'accumulation d'eau douce ou d'eau de mer. On peut pour cela utiliser l'énergie cinétique de l'eau, comme l'écoulement d'une rivière, ce qui donnera une petite centrale hydroélectrique, à très faible production.

I.3. L'énergie solaire :

L'énergie solaire est sans aucun doute celle dont nous ressentons le plus les effets dans notre vie quotidienne. C'est grâce aux rayons du soleil que l'on s'éclaire et que l'on se chauffe. C'est incontestablement la source d'énergie la plus durable que l'on ait.

Pour produire de l'électricité, on peut utiliser cette énergie de deux manières : soit en transformant la lumière en électricité par le biais de cellules photovoltaïques, ou la chaleur en électricité grâce à des centrales électriques solaires. On peut aussi utiliser l'énergie solaire pour chauffer l'eau, et ce par le biais de panneaux solaires thermiques que l'on appelle chauffe-eau solaire.

I.4. La géothermie :

Les premières traces d'utilisation de la géothermie par l'homme remontent à plus de 20 000 ans. Tout au long de l'histoire des civilisations, la pratique des bains thermaux s'est multipliée et depuis un siècle, les exploitations industrielles se sont développées pour la production d'électricité et le chauffage urbain.

Le principe est de récupérer la chaleur se trouvant en profondeur dans notre planète soit en pompant directement de l'eau chaude vers la surface, soit en exploitant la température élevée des roches en profondeur en y injectant de l'eau depuis la surface. Cette chaleur fait tourner des turbines qui entraînent des alternateurs. Cette énergie est d'un usage courant en Islande où elle est facile à mettre en œuvre.

I.5. La biomasse :

On appelle biomasse l'ensemble des matières organiques d'origine naturelle que l'on peut convertir en énergie. On observe déjà ce phénomène chez les végétaux, qui, grâce au soleil, l'eau et le CO₂ synthétisent des sucres, et donc, de l'énergie chimique. C'est le phénomène bien connu de la photosynthèse. On peut donc utiliser cette énergie. Soit en brûlant ces végétaux de manière directe, comme pour le bois, ou en les transformant en biogaz ou biocarburants. On peut aussi utiliser la biomasse pour produire de l'électricité, selon le principe de la centrale thermique.

Cependant, l'utilisation de la biomasse n'est pas très rentable pour ce qui est de la production d'électricité. Elle est surtout utilisée à petite échelle, ou devient rentable grâce à la cogénération [15].

II. Energies choisies :

Il y a donc un large éventail d'énergies renouvelables pouvant être utilisées pour une unité d'extraction d'huiles essentielles. Cependant, notre choix c'est porté pour deux d'entre elles :

- **La biomasse :** Après extraction de l'huile essentielle, nous disposons de matière végétale que l'on peut récupérer et exploiter en la brûlant, afin d'obtenir l'énergie nécessaire à la production de vapeur.
- **Le solaire:** Le solaire s'impose de lui-même, étant donné l'énorme potentiel que possède l'Algérie et les dimensions de notre unité. Il se peut que nous ayons besoin de plus d'énergie pour l'extraction à la vapeur d'eau, et d'électricité pour faire fonctionner l'aérocondenseur.

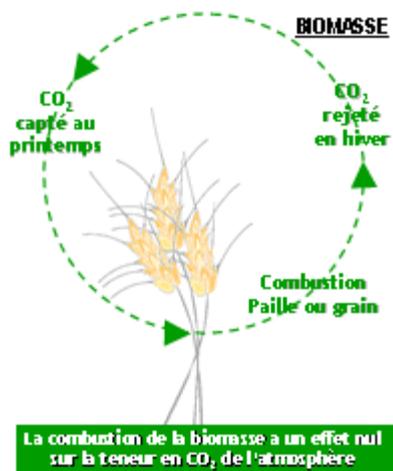
III. La biomasse :

III.1. Définition :

Depuis toujours, l'Homme a brûlé du bois - l'une des principales sources d'énergies renouvelables- pour se chauffer et faire cuire les aliments. Bien avant que les combustibles fossiles n'aient été exploités, le bois était le combustible universel, et, aujourd'hui encore, il est le principal combustible pour les besoins domestiques dans de nombreuses parties du monde, en particulier dans les zones rurales.

En effet, la biomasse (bois, déchets) constitue 11% de l'approvisionnement en énergie primaire. C'est la quatrième plus grande source d'énergie primaire (après le pétrole, le charbon et le gaz naturel), devant l'énergie nucléaire et l'hydroélectricité.

Le terme "biomasse" désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale que l'on peut convertir en énergie. Les cultures énergétiques recouvrent des plantes très diverses telles que les oléagineux, les graminées comme le maïs et la bégasse (plantes riches en carbone), le bois... Les déchets peuvent être solides (industriels, agricoles ou ménagers) ou liquides (eaux usées, déjections animales).



La biomasse est une énergie renouvelable, et peu polluante. Bien qu'elle libère du CO₂ en brûlant, comme le biocarburant et le bois, il ne faut pas oublier que ce CO₂ avait déjà été extrait de l'atmosphère par la plante lors de sa croissance. À court terme, il est indéniable que toutes les installations de combustion participent à l'augmentation de la charge atmosphérique de dioxyde de carbone. Toutefois, le bilan quantitatif CO₂ est nul une fois l'équilibre atteint, à condition que toute l'énergie qu'il a fallu dépenser pour extraire du combustible de la biomasse soit lui aussi d'origine biomasse [8].

Figure 15 : Cycle du CO₂ rejeté par la biomasse [8]

L'utilisation des déchets recyclés protège non seulement l'environnement mais permet de faire un gain d'énergie et d'argent considérable.

La valorisation énergétique de la biomasse conduit à trois formes d'énergies utiles, 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). On peut aussi la classer selon le type de conversion [8]:

III.1.1. La conversion thermochimique (combustion) :

Pour ce faire, on utilise généralement la paille, la canne à sucre, les déchets agricoles, mais surtout le bois. L'énergie de la biomasse est libérée par combustion, sous forme de chaleur, et est utilisée pour chauffer, ou pour produire de l'électricité. La combustion s'effectue en réunissant la biomasse (le combustible), l'air (le comburant), et une flamme, dans un brûleur, selon la transformation suivante :



Les cendres obtenues lors de la combustion peuvent servir d'engrais, et le bilan CO₂ est nul comme nous l'avons vu précédemment.

Cependant, le pouvoir calorifique de la biomasse complètement sèche est inférieure à celui des énergies fossiles (pour le bois seulement 55% du pouvoir calorifique du charbon) et plus la biomasse est humide, plus son pouvoir calorifique s'amointrit. Il faut donc la faire sécher. On peut cependant transformer le bois en charbon de bois, ce qui double sa capacité calorifique. La biomasse utilisée comme combustible provient des forêts, des déchets de l'industrie et de l'agriculture, de la papeterie, etc. [8]

III.1.2. La conversion biologique ou biogaz :

Elle consiste en l'utilisation des biogaz. Le biogaz est un gaz produit par fermentation de la matière organique issue des déchets ménagers, industriels ou de l'agriculture, en l'absence d'oxygène.

On parle de "digestion anaérobie", car le même phénomène se déroule dans le système digestif. On parle également de "méthanisation" car ce biogaz est composé principalement de méthane.

Entre 40% et 60% de la biomasse humide est converti en biogaz en 10-25 jours. Ce gaz a une composition de 65% de méthane et de 35% de dioxyde de carbone, avec un pouvoir calorifique d'environ 25 MJ.

Elle se produit spontanément dans les décharges contenant suffisamment de déchets organiques, et artificiellement dans un digesteur, obtenant ainsi du gaz et un engrais sec.

Le biogaz est utilisé dans les chaudières à gaz pour produire de la chaleur pour les fermes et bâtiments, et à plus grande échelle, pour produire de l'électricité de la même façon que le gaz naturel, ou servir de carburant pour les voitures à gaz [8].

III.1.3. Biocarburants

Un biocarburant est un carburant produit à partir de la biomasse. Cette production peut se faire selon deux procédés distincts:

- La fermentation alcoolique : Elle se fait à partir de produits naturels saccharifères. Après hydrolyse et préparation d'une solution sucrée soumise à la fermentation, de l'éthanol est obtenu par distillation. On obtient ainsi un biocarburant, qui, par combustion, peut produire de l'électricité.
- La transformation chimique : Elle se fait à partir de produits naturels oléagineux (graine de coton, lin, colza, soja, graines de tournesol), afin d'obtenir du biofioul ou biodiesel [8].

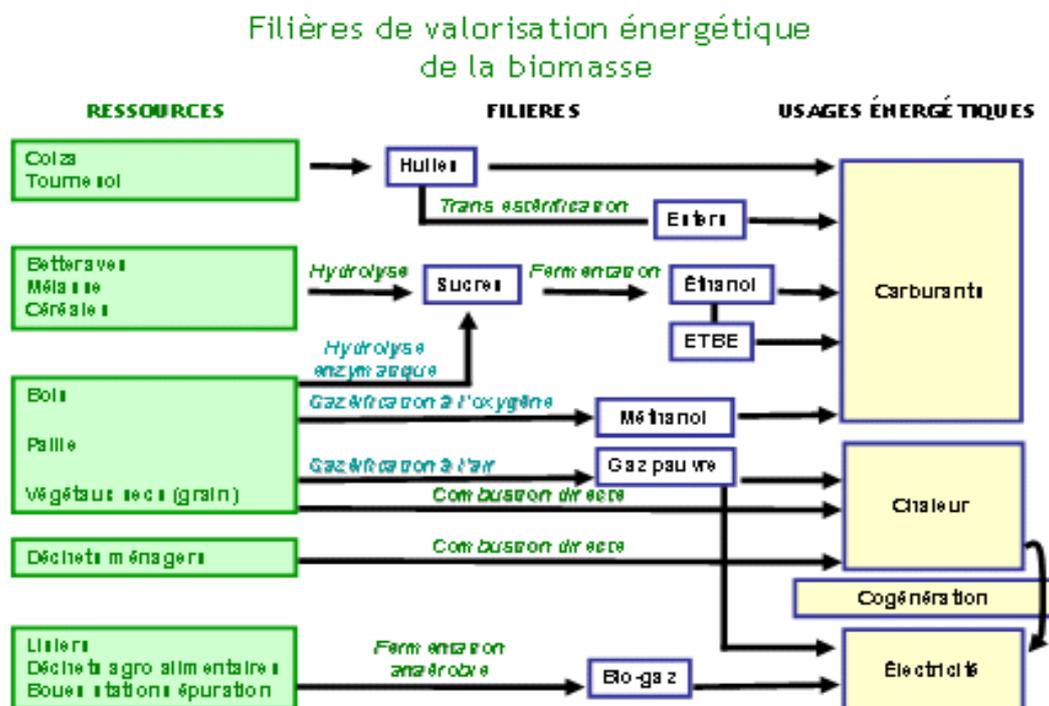


Figure 16 : Filières de valorisation énergétique de la biomasse [8]

III.2. 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 [36].

III.2.1. 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 [36].

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, 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 : principalement constituée par la filière thermochimique, qui regroupe les technologies de la combustion, de la gazéification et de la pyrolyse, pour lesquelles les biomasses de faible teneur en humidité ont une meilleure efficacité énergétique.

-La voie humide : la principale filière de cette voie est la bio méthanisation. Cependant, certaines techniques de la filière thermochimique (combustion, pyrolyse) peuvent également traiter des biomasses humides. Mais ceci se réalise aux dépens de l'efficacité énergétique. Il peut être plus intéressant avec des biomasses humides - déchets organiques verts très humides, déchets ménagers, effluents d'élevage, d'agro-industrie - de les traiter par voie humide [37].

III.2.2. Teneur en 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 [36].

III.2.3. 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 [36].

III.2.4. 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 [36].

III.2.5. 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 [36].

III.2.6. 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 [36] :

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

IV. L'énergie solaire :

L'énergie solaire est sans aucun doute celle dont nous ressentons le plus les effets dans notre vie quotidienne. En effet, c'est grâce aux rayons du soleil que l'on s'éclaire et l'on se chauffe. C'est incontestablement la source d'énergie la plus durable que l'on ait.

Elle dérive de la fusion de l'hydrogène en hélium. Cette énergie est rayonnée dans l'espace sous formes d'ondes électromagnétiques, dont une partie arrive sur terre. La puissance totale rayonnée par le Soleil de $3,85 \times 10^{23}$ kW (ce qui correspond à environ 6 millions de tonnes de matière transformées en énergie par seconde et un millième de sa masse théoriquement consommée en 5 milliards d'années).

La Terre reçoit donc une énergie d'environ 1 533 millions de GWh en 365 jours, soit environ dix mille fois la consommation énergétique de l'humanité en 2002 qui était de 150 millions de GWh [38].

Cependant, nous ne pouvons l'exploiter directement que pour nous chauffer et nous éclairer. C'est pourquoi nous utilisons des processus de conversion, tels que les panneaux photovoltaïques ou les collecteurs paraboliques pour obtenir de l'électricité, et des panneaux solaires thermiques pour obtenir de la chaleur.

IV.1. L'énergie solaire photovoltaïque :

IV.1.1. Présentation :

L'énergie solaire photovoltaïque est donc la transformation du rayonnement solaire en électricité, par le biais de cellules photovoltaïques. L'électricité photovoltaïque a plusieurs utilisations :

- L'alimentation électrique de sites et d'habitations isolés, situés loin d'un réseau électrique (zones rurales dans les pays en développement, relais de communication, téléphones sur les autoroutes, balises en mer, satellites...).
- Des systèmes raccordés au réseau électrique (toits et murs photovoltaïques de maisons, centrales photovoltaïques).
- D'autres applications individuelles, comme les montres et les calculettes alimentées par des cellules de faible puissance [39].

IV.1.2. Historique du photovoltaïque :

C'est en 1839 qu'Antoine Becquerel constate les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide, suivi en 1877 de W. G. Adams et R. E. Day qui découvrent l'effet photovoltaïque du sélénium (élément chimique, oligoélément à très faible dose).

Cependant, les recherches avancent lentement, et ce n'est qu'en 1941 que la première jonction PN dans le silicium, à effet photovoltaïque, est réalisée. Les premières applications ont lieu dès les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés.

Des laboratoires de recherche proposent maintenant d'autres manières de construire les composants photovoltaïques et d'autres matériaux semi-conducteurs que le silicium : le choix peut être en effet extrêmement large si on se tourne vers les matériaux composés.

La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire est apte à répondre à une demande croissante d'énergie renouvelable. Elle est considérée comme devant prendre une part significative dans l'approvisionnement énergétique mondial [40].

IV.1.3. Principe de fonctionnement :

Les panneaux photovoltaïques fonctionnent grâce aux semi-conducteurs. Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et des isolants. Parmi les semi-conducteurs les plus utilisés en électronique, on peut citer le germanium et le silicium (corps le plus abondant dans la nature).

Lorsque la température s'élève, sous l'effet de l'agitation thermique, des électrons réussissent à s'échapper et participent à la conduction. Ce sont les électrons situés sur la couche la plus éloignée du noyau qui s'impliquent dans les liaisons covalentes. Dans le cristal, ces électrons se situent sur des niveaux d'énergie appelée *bande de valence*. Les électrons qui peuvent participer à la conduction possèdent des niveaux d'énergie appartenant à la *bande de conduction*. Entre la bande de valence et la bande de conduction peut se situer une *bande interdite*. Pour franchir cette bande interdite l'électron doit acquérir de l'énergie (thermique, photon...). Pour les isolants la bande interdite est quasi infranchissable, pour les conducteurs elle est inexistante. Les semi-conducteurs ont une bande interdite assez étroite.

En résumé le processus de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque repose sur le fait qu'un photon déloge un électron, créant un trou. L'électron devrait trouver rapidement un trou pour se replacer, dissipant ainsi l'énergie apportée par le photon. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner simplement en son sein : ainsi, il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme une pile. Pour cela, on s'arrange pour créer un champ électrique permanent au moyen d'une jonction PN.

L'électricité créée par les cellules solaires est récupérée sous forme de courant continu et on l'utilise ou on le transforme en courant alternatif au moyen d'un onduleur auquel les panneaux sont reliés [39].

IV.1.4. Technologie et rendement des panneaux solaires photovoltaïques :

Un panneau photovoltaïque est un système de câblage électrique de plusieurs cellules photovoltaïques, logées dans une enveloppe de protection contre les intempéries et les influences environnementales, avec isolation électrique.

Les cellules photovoltaïques sont assemblées en série entre elles pour créer un réseau. Le matériau utilisé est le silicium, métal très abondant sur la terre. Il doit être raffiné par un procédé industriel complexe afin d'être suffisamment pur pour être utilisé dans l'industrie des semi-conducteurs et du photovoltaïque [39].

On retrouve différents types de panneaux photovoltaïques selon le matériau utilisé :

- Le silicium polycristallin, qui est le matériau photovoltaïque le plus utilisé. Son avantage est le rendement (12 %) et les coûts de fabrication raisonnables.
- Le silicium monocristallin, dont le rendement est plus élevé que le silicium polycristallin (15%), mais la fabrication plus délicate, et donc le coût plus élevé.
- Le silicium amorphe, qui a un rendement inférieur aux deux autres (6%).
- Les cellules organiques, encore au stade du laboratoire, ouvriraient la voie à des modules de très faible coût. Les rendements actuels sont de 3% au mieux, ce qui suffit à certains marchés. Mais la stabilité des performances n'est pas encore maîtrisée.

De nos jours, avec la technologie existante, les cellules des panneaux solaires commercialisés ont un rendement d'environ 17 à 20 %. Le rendement des cellules d'un panneau solaire calcule donc le pourcentage d'énergie lumineuse converti en énergie électrique. Les recherches se poursuivent pour tenter d'améliorer les rendements. D'une manière générale, on peut augmenter le rendement des cellules photovoltaïques :

-Soit en purifiant au maximum le semi-conducteur utilisé.

-Soit en empilant plusieurs semi-conducteurs qui vont chacun utiliser une longueur d'onde lumineuse un peu différente et donc, à plusieurs, être plus efficaces [8].

IV.1.5. Puissance photovoltaïque :

La puissance totale d'une installation solaire est obtenue en additionnant la puissance nominale de chaque panneau solaire. Cette puissance nominale totale s'exprime en kWc : on l'appelle puissance nominale ou encore puissance crête. Pour calculer la production d'électricité annuelle d'une installation solaire, on multiplie donc simplement la puissance nominale de l'installation par le nombre d'heures annuelles d'irradiation solaire.

Le soleil irradie en permanence la terre avec une puissance maximum de 1000 watt/m². Dans la réalité, cette irradiation est souvent en dessous de 1000 watt/m² entre autre en fonction des nuages, de l'ombre, de l'orientation et la position géographique. Il existe dans chaque pays des données généralement fournies par les services météorologiques ou autres instituts spécialisés, qui indiquent précisément pour un lieu donné l'irradiation annuelle totale, mois après mois. Ces données sont des indicateurs fiables qui varient peu dans le temps et permettent de calculer précisément la production annuelle d'une installation solaire.

Les cellules d'un panneau solaire récupèrent, donc au maximum environ 17 à 20 % de l'énergie solaire (1000 watt/m²), soit environ 170 à 200 watt par m² de cellules solaires.

En considérant les pertes dues aux espaces entre les cellules et le cadre dans un panneau solaire, on arrive à un rendement moyen maximum d'environ 130 à 140 watt par m² de panneau solaire [39].

IV.1.6. Installations et cout du photovoltaïque :

Il existe une multitude d'options prix/rendement/qualité pour les petits modules, dans les domaines des applications professionnelles et grand public, de petite puissance où ils sont intégrés par les fabricants eux-mêmes dans leurs propres boîtiers.

Pour le grand public, on y trouve des objets aussi divers que les calculettes de poche, les montres, les sonnettes de portes, les lampes de poche, les détecteurs de présence, les lampes de jardin, les toits ouvrants d'automobiles, les modules souples pour le camping et la navigation de plaisance.

Pour les professionnels, il y a les clôtures électriques, l'instrumentation scientifique, les parcmètres urbains, les téléphones d'urgence autoroutiers, les casques à soudeuse, les paratonnerres, etc. Mais le photovoltaïque connaît surtout un grand essor dans le secteur du bâtiment, où les particuliers comme les professionnels sont encouragés en Europe par des dispositifs de fiscalité à installer des panneaux photovoltaïques reliés au réseau électrique.

Le coût d'un système photovoltaïque va dépendre principalement de sa taille et du mode d'intégration au bâtiment qui sera choisi. Le tableau ci-après donne un ordre de grandeur des coûts matériel + pose, en €/Wc, qui peuvent être rencontrés dans diverses configurations [41]:

Tableau 4 : Prix du d'une installation photovoltaïque en fonction de sa puissance [41]

	Pose au sol ou sur toiture	Intégration toiture, simple	Intégration verrière, tuiles PV
1 à 3 kWc	6 à 7 €/Wc	7 à 9 €/Wc	> 9€/Wc
+ de 10 kWc	4 à 6 €/Wc	6,5 à 8 €/Wc	< 13 €/Wc

IV.2. Solaire thermique :

IV.2.1. Présentation :

Le solaire thermique permet de récupérer la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, parfois de l'air, le plus souvent de l'eau, par la mise en œuvre de capteurs solaires.

Ces techniques peuvent assurer la production d'eau chaude sanitaire ou d'eau distillée, le chauffage des piscines et des habitations ainsi que le séchage de céréales, par exemple.

Un capteur solaire est composé des éléments suivants [43]:

- Le corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant,
- Un système de refroidissement par le fluide caloporteur,
- Un isolant thermique (dos et côtés non exposés),
- Une couverture transparente (face avant, exposée au rayonnement) qui assure l'effet de serre,
- Subsidièrement un coffrage étanche à l'eau et un système de support mécanique de l'ensemble.

Les principaux types de capteurs solaires thermiques sont les suivants :

IV.2.2. Les capteurs plans :

Trois fonctions incombent à ces capteurs, absorber le rayonnement solaire, le transformer en chaleur et transmettre cette chaleur au fluide caloporteur. Pour absorber au maximum l'énergie rayonnée du soleil, il suffit d'une surface plane placée de façon judicieuse ; cette surface doit être dotée du coefficient d'absorption de la couche superficielle le plus élevé possible.

Les meilleurs coefficients sont de l'ordre de 0,95. Seules les couleurs foncées permettent d'obtenir des valeurs aussi élevées, l'idéal étant le noir évidemment. Pour limiter les pertes par réémission de rayonnement infrarouge, il importe que l'absorbeur possède aussi la propriété d'émissivité superficielle la plus faible possible (valeur inférieure à 0,15). Dans ce cas, l'absorbeur sera qualifié de « sélectif » [45].

IV.2.3. Les capteurs à concentration :

Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques ou cylindro-paraboliques pour concentrer les rayons solaires respectivement dans le foyer ponctuel ou dans le foyer linéaire de ces surfaces. Dans le foyer ponctuel ou le long du foyer linéaire se trouvent les récepteurs (absorbeurs) qui captent la chaleur solaire ainsi concentrée. Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. Dans un concentrateur cylindro-parabolique, le fluide caloporteur (eau, huile thermique ou gaz) peut être porté à environ 400 °C. Dans les concentrateurs paraboliques, on peut obtenir des températures plus élevées (jusqu'à 1500 °C). Ces types de collecteurs solaires sont plus adaptés pour la production de chaleur industrielle et d'électricité [45].

IV.3. Potentiel solaire Algérien :

L'Algérie possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, et l'un des plus élevés au monde. La preuve en a été apportée par l'Agence spatiale allemande (ASA), qui a procédé à une évaluation par satellites. Les résultats semblent sans équivoque. Le potentiel est ainsi estimé à 440 TWh/an pour le solaire thermique, et de 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque.

La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m² par an au Nord et 2263 KWh/m² par an au Sud du pays [44].

Tableau 5: Potentiel solaire en Algérie pour différentes régions [46]

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m2/an)	1700	1900	2650

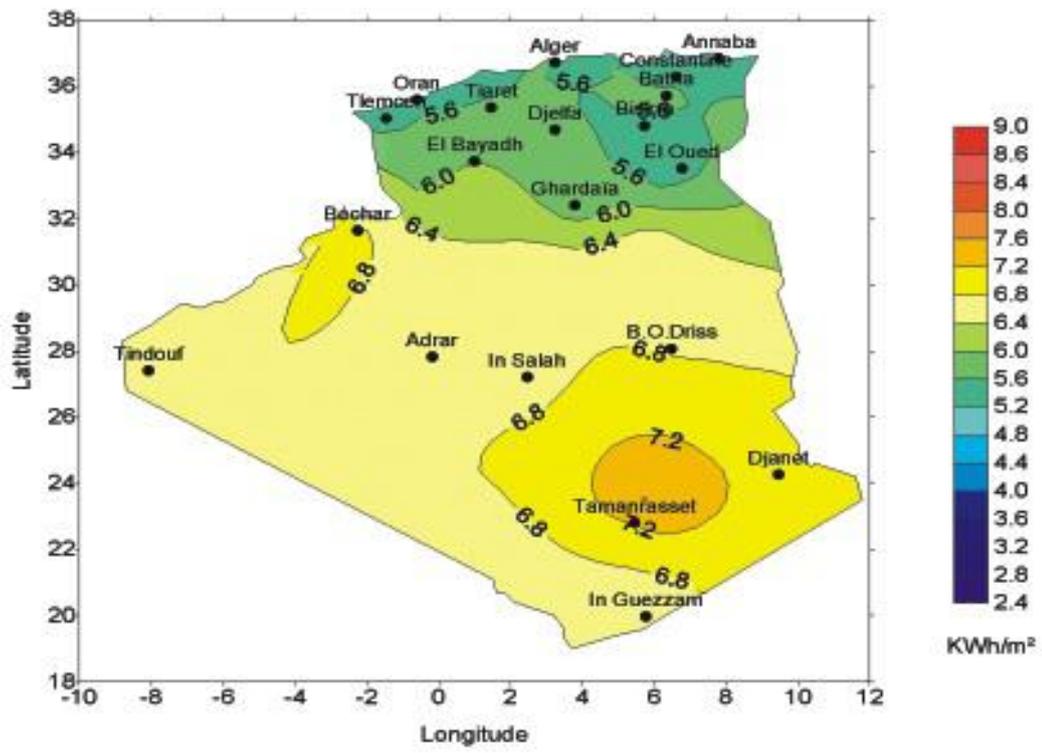


Figure 17: Irradiation solaire annuelle moyenne reçue sur le territoire Algérien [44]

Chapitre II: Bilan Énergétique

Nomenclature Chapitre II

Nom	description	Unité
ΔH_{vap}	Chaleur de vaporisation de l'eau	[kJ/kg]
Cp	Chaleur spécifique massique	[Cal/g°C]
Jr	jour	-
Me	Débit de vapeur journalier	[L/jr]
B	Rendement optique du capteur	-
K	Coefficient de pertes	[W / °Cm ²]
T	température	[°C]
V	Débit volumique de l'eau	[L/jr]
Q_1	Chaleur pour l'échauffement	[KWh/jr]
Q_2	Chaleur de vaporisation	[KWh/jr]
Q_3	Chaleur pour la surchauffe	[KWh/jr]
Q_T	Besoin énergétique total	[KWh/jr]

A. Production d'énergie par la biomasse

I. Pouvoir calorifique de la biomasse :

Sur la base de données concernant la valeur énergétique de la biomasse issue de quelques plantes herbacées et non herbacées (Tableau 6), nous avons retenus pour nos calculs un pouvoir calorifique moyen de 4,69 KWh/Kg de biomasse végétale.

Tableau 6: Pouvoir calorifique, teneur en humidité et teneur en cendres de quelques sources de biomasse végétale [47] [48].

Biomasse	Humidité (%)	Pouvoir calorifique (MJ/Kg)	Pouvoir calorifique (KWh/Kg)	Teneur en cendres
Paille de blé	6,3	15,42	4,28	8,0
Paille de soja	8,7	14,87	4,13	6,5
Canne de maïs	6,2	15,49	4,30	6,0
Coques de tournesol	7,1	17,22	4,78	3,6
Graines de tournesol	9,0	20,02	5,56	-
Miscanthus	6,0-10,0	16,80	4,66	2,8-3,8
Chanvre (énergétique)	10,0-12,0	16,10	4,47	6,7 – 7,0
Paille de riz	20,0-25,0	13,50-14,40	3,75-4,00	-
Cannes de tournesol	25,0-30,0	12,40-13,50	3,40-3,75	-
Tourteau de colza	10,0	17,89	4,97	-
Paille de colza	10,0-15,0	15,30-16,20	4,25-4,5	-
Colza pure	8,0-9,0	24,58	6,83	-
Paille d'orge	15,0	17,50	4,86	4,8
Peuplier noble	10,0-12,0	17,80	4,94	2,0-2,3

II. Estimation des pertes de chaleur :

Les pertes de chaleur qu'il peut y avoir sont:

- Les pertes à travers les gaz brûlés de la cheminée ;
- Les pertes à travers les parois ;
- Les imbrulés.

II.1. Pertes par gaz brûlés :

À la sortie du foyer de combustion, les gaz brûlés constitués par ce qu'il reste de l'air (excès d'air, azote) et les produits de la combustion (acide carbonique, vapeur d'eau, etc.) s'échappent dans l'atmosphère présentant un pourcentage de pertes.

Vu qu'on brûle de la biomasse, les gaz brûlés peuvent être considérés comme des gaz humides [39].

La température de sortie des gaz est au voisinage de 200°C [49]

Le graphique qui suit nous donne le pourcentage de pertes de chaleur en fonction de la température de sortie des gaz brûlés humides [39]

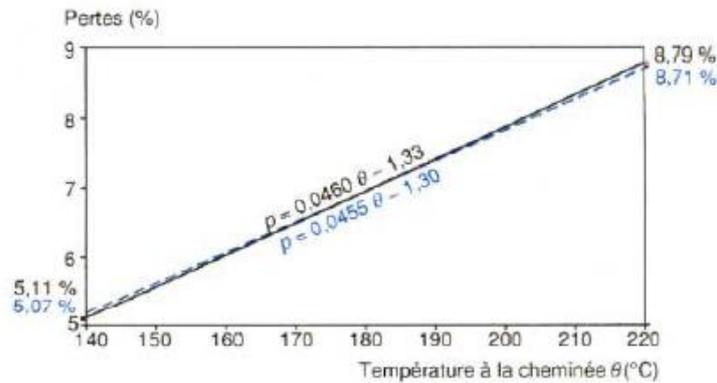


Figure 18 : Pertes de chaleur en fonction de la température de sortie de gaz brûlés [39]

On constate que ces pertes n'excèdent pas 10%. Pour nos calculs, on prendra donc 10% de pertes par gaz brûlés.

II.2. Pertes à travers les parois :

Ces Pertes peuvent se produire soit par rayonnement ou par convection externe. Compte tenu de la difficulté de leur estimation précise et de leur faiblesse relative vis-à-vis des autres pertes, il a été convenu de les évaluer forfaitairement.

Ces pertes sont faibles puisque :

- Pour des raisons de protection du personnel, il est souvent imposé une température limite de la tôle externe qui recouvre le calorifuge ;
- L'épaisseur courante de calorifuge, comprise entre 50 et 100 mm, intervient relativement peu dans le prix en tant que fourniture, la majorité du coût étant due au dispositif d'accrochage, à la pose et à la fourniture de la protection externe ; le surcoût, pour obtenir une température de tôle convenable, n'est pas très élevé ;

Ces pertes par rayonnement et convection externe, proportionnelles à l'enveloppe extérieure de la chaudière, diminuent en valeur relative quand la puissance de la chaudière s'accroît.

Pour une bonne isolation les pertes à travers les parois ne dépassent pas 1% pour une production 10 MW [39].

Par exemple si on brûle 100Kg/h de biomasse ça générerai une puissance de 444KWh/kg soit 0.44 MW. Pour une telle puissance, les pertes seraient de 2% environ. Cette valeur est estimée par le graphique qui suit :

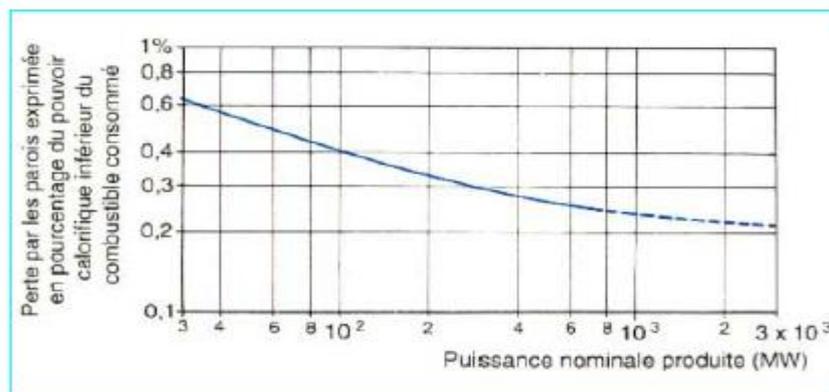


Figure 19 : Evaluation conventionnelle de la perte par les parois [39]

II.3. Pertes par imbrûlés :

Les pertes par imbrûlés, ou par combustion incomplète, se composent d'imbrûlés solides (perte par carbone dans les mâchefers et dans les suies) et d'imbrûlés gazeux (CO, hydrogène et hydrocarbures). Elles sont fortement réduites (imbrûlés solides) ou annulées (imbrûlés gazeux) lorsque l'on a réuni les éléments favorables à une bonne combustion.

La mesure des pertes par imbrûlés gazeux se fait par analyse des fumées ; celle des imbrûlés solides par évaluation de la quantité de carbone recueillie dans les cendres. Il est donc difficile d'estimer cette partie de pertes.

Dans un ordre global, on estimera les pertes de chaleur lorsqu'on brûle de la biomasse à 30% pour se placer dans le cas le plus défavorable [39].

On sait qu'en moyenne la biomasse a un pouvoir calorifique net de 4.69 KWh/Kg. En prenant en compte les pertes de chaleur qui sont estimés à 30%, ce pouvoir est réduit à 70% de sa valeur nette à savoir 3.28 KWh/kg.

III. Bilan énergétique :

III.1. Estimation des chaleurs spécifiques moyennes :

Le condenseur utilisé est un échangeur. Le but de ce calcul est la détermination de la surface d'échange nécessaire pour la condensation de la vapeur produite.

Dans ce calcul on assimile les vapeurs de tête de l'extracteur à une vapeur d'eau car la proportion d'huile essentielle présente est négligeable, comparée à la quantité de vapeur d'eau. On suppose donc que les propriétés de la vapeur d'eau ne sont pas modifiées.

Pour faire ce calcul nous avons besoin de la chaleur spécifique de l'eau et celle de la vapeur d'eau à des températures différentes, pour cela nous avons pris l'interpolation polynomiale de la courbe d'évolution de $C_p = f(T)$ pour l'eau entre les températures 15°C et 100°C et la vapeur d'eau entre 100°C et 400°C. La courbe obtenue dans le cas de l'eau est la suivante [17] :

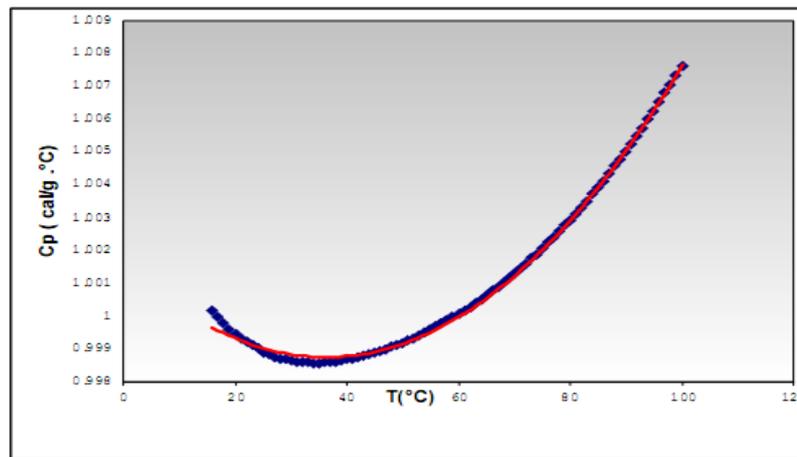


Figure 20: Evolution de la chaleur spécifique de l'eau en fonction de la température [17]

Sur la base de cette interpolation l'équation obtenue, avec un coefficient de corrélation de 0.997, est :

$$C_p(T) = 2.10^{-6}T^2 - 0.0002T + 1.0007 \quad [17]$$

La courbe obtenue dans le cas de la vapeur d'eau est la suivante :

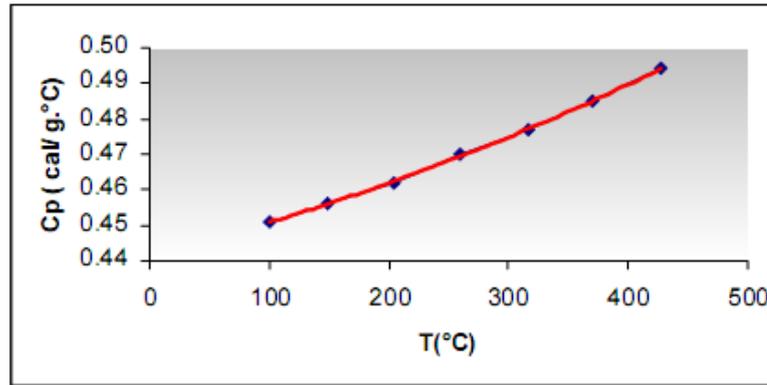


Figure 21: Evolution de la chaleur spécifique de la vapeur d'eau en fonction de la température [17]

L'équation de la courbe de tendance, avec un coefficient de corrélation de 0.999, est:

$$Cp(T) = 9.10^{-8}T^2 + 8.10^{-5}T + 0.4417 \quad [17]$$

III.2. Détermination des besoins énergétiques :

Dans ce qui suit nous supposons que le débit massique est constant.

Quantité de Chaleur nécessaire pour l'échauffement de l'eau de 15°C à 100°C

$$Q_1 = Me \times \int Cp \times dT$$

$$\text{Avec : } Cp [15^\circ\text{C} ; 100^\circ\text{C}] = 2.10^{-6} T^2 - 0,0002T + 1,0007 [\text{Cal/g.}^\circ\text{C}]$$

Quantité de Chaleur nécessaire pour la vaporisation de l'eau à 100°C

$$Q_2 = Me \times \Delta H_{vap}$$

Quantité de Chaleur nécessaire pour la surchauffe de la vapeur de 100°C à 110°C

$$Q_3 = Me \times \int Cp \times dT$$

$$\text{Avec } Cp [100^\circ\text{C} ; 110^\circ\text{C}] = 9.10^{-8} T^2 + 8.10^{-5} + 0,4417 [\text{Cal/g.}^\circ\text{C}]$$

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Exemple de Calcul :

Pour un débit de vapeur $Me = 100 \text{ L/J}$

Echauffement :

$$Q_1 = Me \times \int Cp \times dT$$

$$Q_1 = 100 \times (0,66.10^{-6} T^3 - 0,0001T^2) + 1,0007T) \quad T : [15 ; 100]^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = 8528.19 \text{ kcal/Jr}$$

$$Q_1 = 9,9 \text{ KWh/Jr}$$

Vaporisation : $\Delta H_{vap} = 2501 \text{ KJ/Kg}$ à $T = 100^\circ\text{C}$ [4]

$$Q_2 = Me \times \Delta H_{vap} = 100 \times 2501 = 250,1 \times 10^3 \text{ KJ/jr}$$

$$Q_2 = 59823.5 \text{ Kcal/Jr}$$

$$Q_2 = 69.57 \text{ KWh/Jr}$$

Surchauffe :

$$Q_3 = Me \times \int Cp \times dT$$

$$Q_3 = 100 \times (3.10^{-8} T^3 + 4.10^{-5} T^2 + 0.4417 T) \quad T : [100 ; 100] \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Q_3 = 451 \text{ Kcal/ Jr}$$

$$Q_3 = 0,53 \text{ KWh/Jr}$$

$$QT = 80 \text{ KWh/Jr}$$

On résumera dans le tableau qui suit les différents besoins énergétiques pour produire différents débits de vapeur en brûlant de la matière végétale, et en prenant en considération les pertes de chaleur.

Tableau 7 : Pourcentage de contribution de la biomasse au recouvrement des besoins de production de vapeur d'eau.

Débit matière (Kg/j)	Débit vapeur (l/h)	Besoin énergétique KW	Capacité biomasse KW	Capacité biomasse avec perte de chaleurs	100 % rendement de la biomasse
200kg/j (8h) 25kg/h	25	20	117.25	82.07	+ 4.12
	50	40			+2.06
	100	80			+1.03
	200	160			0.52
	400	320			0.26
400 kg/j (4h) 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
400 kg/j (8h) 50 kg/h	25	20	234.5	164.15	+8.24
	50	40			+4.12
	100	80			+2.06
	200	160			+1.03
	400	320			0.52
800 kg/j (4h) 200 kg/h	25	20	938	656.6	+32.96
	50	40			+16.48
	100	80			+8.24
	200	160			+4.12
	400	320			+2.06
800 kg/j (8h) 100kg/h	25	20	469	328.3	+16.48
	50	40			+8.24
	100	80			+4.12
	200	160			+2.06
	400	320			+1.03
1600 kg/j (4h) 400 kg/h	25	20	1876	1313.2	+65.92
	50	40			+32.96
	100	80			+16.48
	200	160			+8.24
	400	320			+4.12
1600 kg/j (8h) 200 kg/h	25	20	938	656.6	+32.96
	50	40			+16.48
	100	80			+8.24
	200	160			+4.12
	400	320			+2.06

De ce tableau on peut conclure :

- Que la biomasse produit 4 fois plus des besoins énergétiques de l'unité, par exemple si on brûle 50 kg/h de matière végétale on produira 200l/h de vapeur.
- Pour des débits de vapeur supérieurs à 4 fois la matière végétale, brûler de la biomasse ne suffirait pas à produire la quantité de vapeur désirée. Par exemple pour produire 400l/h de vapeur en brûlant 50kg/h de biomasse on se retrouve avec un manque en énergie de 48%.
- Pour essayer de combler ce manque en énergie, on a pensé à installer le solaire thermique pour chauffer de l'eau jusqu'à 100°C.

B. Production d'énergie par le solaire thermique :

Afin de prévoir une éventuelle insuffisance d'énergie produite à partir de la biomasse, nous évaluerons l'énergie que peut apporter le solaire thermique à notre unité. Pour cela, nous avons utilisé un logiciel de dimensionnement solaire proposé par le bureau d'études techniques TECSOL : le logiciel SOLO2000. Ce dernier est considéré comme un des pionniers des Energies Renouvelables en France et en Europe.

I. Présentation du logiciel SOLO 2000 :

Le logiciel SOLO 2000 permet de dimensionner les installations solaires de production d'eau chaude sanitaire. Il sert d'outil informatique de référence dans le cadre d'une Garantie de Résultats Solaires (GRS) mise en place par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie - France).

Il a été réalisé à partir de deux documents de référence :

- SOLO : Méthode mensuelle d'évaluation des performances thermiques des systèmes solaires de production d'eau chaude sanitaire.
- PSD : Méthode mensuelle d'évaluation des performances des Planchers Solaires Directs. Ce logiciel offre de nombreuses fonctionnalités telles que :
 - Une modélisation complète d'un système de chauffe-eau solaire (capteurs, ballons, échangeur, appoint, boucle de captage).
 - Une interface évolutive en fonction de la complexité du système modélisé.
 - Une prise en compte des masques de capteurs.
 - Un calcul de la couverture des besoins mensuels en énergie [42].

II. Configuration du logiciel :

Détermination du nombre de panneaux solaires

La Surface maximale dont nous disposons pour les panneaux solaires était dictée par celle du toit du Mobilab qui est de 21 m². Or, nous devons prendre en compte le fait que nous aurons peut être à utiliser des panneaux solaires photovoltaïques. Nous ne pouvons donc attribuer plus de la moitié de cette surface aux panneaux solaires thermiques. Pour optimiser l'occupation de ces 10.5 m², nous avons optés pour 5 panneaux d'une surface individuelle de 2,1 m² [42].

Inclinaison et orientation des panneaux solaires

L'inclinaison des panneaux solaires prévus pour l'installation pouvant être variée, nous préconisons une inclinaison de 60° en période hivernale et de 30° en période estivale. En ce qui concerne l'orientation, l'installation étant mobile, il est aisé d'orienter toujours les panneaux vers le sud pour optimiser leurs performances énergétiques [42].

Choix des panneaux

Nous prévoyons d'acquérir les capteurs nécessaires à l'installation projetée sur le marché en choisissant, dans la mesure du possible, des capteurs qui présentent un bon rendement optique et un faible coefficient de pertes, comme préconisés par l'ADEME sur la base des normes françaises d'essais des capteurs solaires [42].

Nous choisissons donc le modèle Helioplan d'ACV France, pour son excellente transmission (91%), la facilité et rapidité du montage, et son excellent rapport qualité prix [50].

Tableau 8: Caractéristiques dimensionnelles et pondérales du capteur unitaire retenu [42]

Paramètres	Démentions
Surface (m ²)	2,10
Longueur (m)	1,728
Largeur (m)	1,215
Epaisseur (m)	0,11
Poids du capteur (kg)	127,5

Détermination du type d'installation

Nous avons choisis de placer le ballon d'eau chaude sur le toit du Mobilab de sorte à ce qu'il soit sous les panneaux solaires lorsque ceux-ci sont rabattus. Cette disposition nous a amené à retenir une installation à circulation forcée sans échangeur. La contenance du ballon d'eau chaude a été fixée de façon à couvrir la consommation journalière moyenne [42].

Détermination de la constante de refroidissement

Cette valeur est obtenue par un essai normalisé, et indique les pertes caractéristiques du ballon. Elle est généralement fournie par le fabricant. Cependant le logiciel nous permet de l'évaluer, en fonction de la nature de l'isolant et de l'épaisseur de l'isolant. [42].

Les caractéristiques des panneaux sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 9 : Caractéristiques et réglages de l'inclinaison et de l'orientation des panneaux solaires du Mobilab [42].

Surface	10.50
Inclinaison	45 ° /Horizontale
Orientation	0 ° Sud
Coefficient B	0,82
Coefficient K	3,47 W/m ² . °C
Constante de refroidissement	0,2346 Wh/jr l °C
Epaisseur de l'isolant	60 mm

Calcul de l'apport énergétique des panneaux solaires :

Grace au logiciel SOLO 2000, on peut aisément obtenir l'apport énergétique journalier, mensuel et annuel des panneaux solaires, et ce à partir de données tels que : la région, la température de l'eau chaude, le type de panneaux et leur nombre.

A partir de la, et en fonction du débit d'eau à chauffer, le logiciel suivra les étapes suivantes :

- Calculer les besoins énergétiques journaliers en moyenne mensuelle ;

- Evaluer la consommation journalière et température d'eau froide;

- Calculer le rayonnement global horizontal journalier en moyenne mensuelle, et ce sur le plan des capteurs par des méthodes classiques utilisant d'une part les données astronomiques et la géométrie, d'autre part des corrélations statistiques sur le rayonnement solaire.

Les données météorologiques pour Alger, à la latitude 34.72°, sont regroupées dans le tableau suivant:

Tableau 10: Température en fonction des mois de l'année [42]

Mois	T° extérieure	T° de l'eau
Janvier	11	14.16
Février	12	14.66
Mars	13	15.16
Avril	15	16.16
Mai	18	17.66
Juin	21	19.16
Juillet	24	20.66
Aout	25	21.16
Septembre	23	20.16
Octobre	19	18.16
Novembre	15	16.16
Décembre	12	14.66

Détermination des besoins et apports énergétiques :

Nous avons effectué le calcul pour une eau chaude à 80°C, et différents débits journaliers. Les résultats obtenus par le biais du logiciel SOLO2000 sont les suivants :

Tableau 11: Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=100l/Jr [42]

Mois	Irradiation capteurs (Wh/m ² .jour)	Besoins (kWh/mois)	Apports (kWh/mois)	Apports (kWh/jour)	Taux (%)	Volume (litres)
Janvier	3093	237	180	5.8	76.0	100
Février	4286	213	181	6.5	58.0	100
Mars	5110	234	207	6.7	88.7	100
Avril	5294	223	201	6.7	90.1	100
Mai	5677	225	204	6.6	90.8	100
Juin	5470	212	194	6.5	91.2	100
Juillet	5676	214	196	6.3	91.6	100
Aout	5890	212	194	6.3	91.7	100
Septembre	5548	209	190	6.3	90.9	100
Octobre	4473	223	197	6.4	88.6	100
Novembre	3202	223	179	6.0	80.6	100
Décembre	2831	235	172	5.6	73.2	100

Tableau 12 : Taux de couverture solaire obtenu V=100l/j [42]

Couverture solaire (%)	86.3	Apport solaire annuel (kWh/an)	2296
Besoin annuel (kWh/an)	2659	Productivité annuelle (kWh/m²/an)	192

Tableau 13: Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=200l/Jr [42]

Mois	Irradiation capteurs (Wh/m ² .jour)	Besoins (kWh/mois)	Apports (kWh/mois)	Apports (kWh/jour)	Taux (%)	Volume (litres)
Janvier	3093	475	297	9.6	62.5	200
Février	4286	425	326	11.6	76.5	200
Mars	5110	467	395	12.8	84.6	200
Avril	5294	445	391	13.0	87.8	200
Mai	5677	449	403	13.0	89.6	200
Juin	5470	424	383	12.8	90.2	200
Juillet	5676	428	389	12.6	91.0	200
Aout	5890	424	387	12.5	91.1	200
Septembre	5548	417	374	12.5	89.6	200
Octobre	4473	446	371	12.0	83.2	200
Novembre	3202	445	303	10.1	68.0	200
Décembre	2831	471	279	9.0	59.2	200

Tableau 14 : Taux de couverture solaire obtenu V=200l/j [42]

Couverture solaire (%)	80.8	Apport solaire annuel (kWh/an)	4297
Besoin annuel (kWh/an)	5318	Productivité annuelle (kWh/m²/an)	360

Tableau15 : Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=400l/Jr [42]

Mois	Irradiation capteurs (Wh/m ² .jour)	Besoins (kWh/mois)	Apports (kWh/mois)	Apports (kWh/jour)	Taux (%)	Volume (litres)
Janvier	3093	949	411	13.3	43.3	400
Février	4286	851	489	17.5	57.5	400
Mars	5110	935	636	20.5	68.0	400
Avril	5294	891	651	21.7	73.1	400
Mai	5677	899	701	22.6	78.0	400
Juin	5470	849	669	22.3	78.8	400
Juillet	5676	855	698	22.5	81.6	400
Aout	5890	848	702	22.6	82.7	400
Septembre	5548	835	654	21.8	78.4	400
Octobre	4473	892	583	18.8	65.4	400
Novembre	3202	891	426	14.2	47.8	400
Décembre	2831	942	382	12.3	40.5	400

Tableau 16 : Taux de couverture solaire obtenu V=400l/j [42]

Couverture solaire (%)	65.8	Apport solaire annuel (kWh/an)	7002
Besoin annuel (kWh/an)	10636	Productivité annuelle (kWh/m²/an)	586

Tableau 17 : Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=800l/Jr [42]

Mois	Irradiation capteurs (Wh/m ² .jour)	Besoins (kWh/mois)	Apports (kWh/mois)	Apports (kWh/jour)	Taux (%)	Volume (litres)
Janvier	3093	1898	491	15.8	25.8	800
Février	4286	1702	610	21.8	35.8	800
Mars	5110	1870	815	26.3	43.6	800
Avril	5294	1781	841	28.0	47.2	800
Mai	5677	1797	937	30.2	52.1	800
Juin	5470	1698	894	29.8	52.6	800
Juillet	5676	1711	959	30.9	56.0	800
Aout	5890	1697	983	31.7	57.9	800
Septembre	5548	1670	890	29.7	53.3	800
Octobre	4473	1783	743	24.0	41.7	800
Novembre	3202	1781	513	17.1	28.8	800
Décembre	2831	1884	453	14.6	24.1	800

Tableau 18 : Taux de couverture solaire obtenu V=800l/j [42]

Couverture solaire (%)	42.9	Apport solaire annuel (kWh/an)	9129
Besoin annuel (kWh/an)	21272	Productivité annuelle (kWh/m²/an)	764

Tableau 19 : Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=1600l/Jr [42]

Mois	Irradiation capteurs (Wh/m ² .jour)	Besoins (kWh/mois)	Apports (kWh/mois)	Apports (kWh/jour)	Taux (%)	Volume (litres)
Janvier	3093	3797	527	17.0	13.9	1600
Février	4286	3403	674	24.1	19.8	1600
Mars	5110	3739	908	29.3	24.3	1600
Avril	5294	3563	938	31.3	26.3	1600
Mai	5677	3595	1060	34.2	29.5	1600
Juin	5470	3395	1015	33.8	29.9	1600
Juillet	5676	3422	1105	35.7	32.3	1600
Aout	5890	3393	1145	36.9	33.7	1600
Septembre	5548	3339	1030	34.3	30.8	1600
Octobre	4473	3566	839	27.1	23.5	1600
Novembre	3202	3563	562	18.7	15.8	1600
Décembre	2831	3768	487	15.7	12.9	1600

Tableau 20 : Taux de couverture solaire obtenu V=1600l/j [42]

Couverture solaire (%)	24.2	Apport solaire annuel (kWh/an)	10289
Besoin annuel (kWh/an)	42544	Productivité annuelle (kWh/m²/an)	861

Tableau 21 : Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=3200l/Jr [42]

Mois	Irradiation capteurs (Wh/m ² .jour)	Besoins (kWh/mois)	Apports (kWh/mois)	Apports (kWh/jour)	Taux (%)	Volume (litres)
Janvier	3093	7594	521	16.8	6.9	3200
Février	4286	6807	689	24.6	10.1	3200
Mars	5110	7478	940	30.3	12.6	3200
Avril	5294	7125	977	32.6	13.5	3200
Mai	5677	7190	1124	36.3	15.6	3200
Juin	5470	6791	1089	36.3	16.0	3200
Juillet	5676	6844	1205	38.9	17.6	3200
Aout	5890	6786	1257	40.5	18.5	3200
Septembre	5548	6679	1123	37.4	16.8	3200
Octobre	4473	7132	898	29.0	12.6	3200
Novembre	3202	7125	579	19.3	8.1	3200
Décembre	2831	7536	484	15.6	6.4	3200

Tableau 22 : Taux de couverture solaire obtenu V=3200l/j [42]

Couverture solaire (%)	12.8	Apport solaire annuel (kWh/an)	10887
Besoin annuel (kWh/an)	85087	Productivité annuelle (kWh/m²/an)	911

III. Conclusions :

Tableau 23 : Pourcentage de contribution de l'énergie solaire et de la biomasse au recouvrement des besoins de production de vapeur d'eau.

Débit matière Kg/jr	Débit vapeur (L/jr)	Besoin en KWh/jr	Biomasse KWh/jr Sans perte	Biomasse KWh/jr avec perte	% biomasse	Apport solaire thermique	% solaire	Solaire et biomasse (kWh/jr)	Solaire et biomasse %	Ce qui reste à fournir(%)
200 Kg/jr	100	80	938	656.6	+820.75	6.31	7.89	662.91	+828.64	
	200	160	938	656.6	+410.38	11.80	7.37	668.4	+417.75	
	400	320	938	656.6	+205.18	19.18	5.99	675.78	+211.17	
	800	640	938	656.6	+102.60	25.00	3.90	681.60	+106.5	
	1600	1280	938	656.6	51.30	28.18	2.20	684.74	53.50	46.50
	3200	2560	938	656.6	25.65	29.80	1.16	686.40	26.81	73.19
400 Kg/jr	100	80	1876	1313.2	+1641.50	6.31	7.89	1319.51	+1649.38	
	200	160	1876	1313.2	+820.75	11.80	7.37	1325.00	+828.12	
	400	320	1876	1313.2	+410.38	19.18	5.99	1332.38	+416.37	
	800	640	1876	1313.2	+205.18	25.00	3.90	1338.20	+209.09	
	1600	1280	1876	1313.2	+102.60	28.18	2.20	1341.38	+104.79	
	3200	2560	1876	1313.2	51.30	29.80	1.16	1343.00	52.46	47.54
800 Kg/jr	100	80	3752	2626,4	+3283.00	6.31	7.89	2632.71	+3290.89	
	200	160	3752	2626,4	+1641.50	11.80	7.37	2638.20	+1648.87	
	400	320	3752	2626,4	+820.76	19.18	5.99	2645.58	+826.75	
	800	640	3752	2626,4	+410.36	25.00	3.90	2651.40	+414.26	
	1600	1280	3752	2626,4	+205.20	28.18	2.20	2654.58	+207.40	
	3200	2560	3752	2626,4	+102.60	29.80	1.16	2656.20	+103.76	
1600 Kg/jr	100	80	7504	5252.8	+6566.00	6.31	7.89	5259.11	+6573.89	
	200	160	7504	5252.8	+3283.00	11.80	7.37	5264.60	+3290.37	
	400	320	7504	5252.8	+1641.50	19.18	5.99	5271.98	+1647.49	
	800	640	7504	5252.8	+820.75	25.00	3.90	5277.80	+824.65	
	1600	1280	7504	5252.8	+410.38	28.18	2.20	5280.98	+412.58	
	3200	2560	7504	5252.8	+205.18	29.80	1.16	5282.60	+206.34	

A partir des résultats de ce tableau, on peut conclure que :

- La biomasse fournit jusqu'à quatre fois l'énergie nécessaire à la mise en vapeur de l'eau, et ce en prenant en compte les pertes de chaleur à travers la chaudière. Elle peut donc largement fournir à notre unité l'énergie dont elle a besoin pour l'extraction.

- Le solaire thermique ne peut couvrir à lui seul les besoins énergétiques de la production de vapeur.
- Dans les rares cas où la biomasse ne peut apporter l'énergie nécessaire à la production de vapeur (débit de vapeur > 4 fois débit de matière), le solaire thermique ne suffit pas à combler le déficit.

On en vient donc à la conclusion que l'utilisation du solaire thermique est inutile pour notre unité, et que la source d'énergie pour la production de vapeur la plus adaptée est la biomasse.

C. Production d'énergie électrique par le solaire Photovoltaïque :

Pour la condensation du mélange de vapeur d'eau et d'huile essentielle obtenus, il se peut que l'on ait besoin d'un aérocondenseur, ou de plusieurs ventilateurs, afin d'accélérer la condensation et de réduire la surface d'échange. Pour les alimenter, il faudra produire de l'électricité. Le photovoltaïque s'impose comme un choix évident, étant donné le potentiel solaire Algérien, et le côté pratique des panneaux que l'on peut disposer sur le toit du Mobilab. Ainsi, la capacité maximale d'électricité que l'on peut produire à partir des panneaux solaires photovoltaïques est limitée par l'espace dont on dispose pour les panneaux, à savoir la surface du toit.

La surface d'un Mobilab moyen étant de 21 m², on peut y disposer 21 m² de cellules photovoltaïques, soit 21 panneaux d'1m². Les tuiles solaires photovoltaïques sont constituées d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles en série ou en parallèle. 1 m² de cellules photovoltaïques délivre une puissance d'environ 100 à 200 W selon leur rendement. On peut donc produire 2,1 KW à 4,2 KW d'électricité, en fonction du type de panneau solaire choisit, et du prix que l'on peut y mettre [51].

Chapitre III:

Conception et dimensionnement du Mobilab

Nomenclature Chapitre III

Nom	Description	Unité
α	Pente de l'avaloir	[Degré]
η	viscosité dynamique	[Kg/m.s]
λ	Coefficient de conduction thermique	[KJ/h.°C.m]
μ	la viscosité de l'eau	[Kg/m.s]
v	Vitesse d'ascension des gouttelettes	[m/s]
ξ	coefficient de résistance	-
ρ	Masse volumique	[Kg/ m ³]
ρ_1	Masse volumique légère	[Kg/m ³]
ρ_2	Masse volumique lourde	[Kg/m ³]
φ	Diamètre Conduite d'air de combustion	[Cm]
DTLM	Différence de température logarithmique moyenne	[°C]
DTLM ₁	Différence de température logarithmique moyenne lors de la désurchauffe	[°C]
DTLM ₂	Différence de température logarithmique moyenne lors de la condensation	[°C]
DTLM ₃	Différence de température logarithmique moyenne lors du refroidissement	[°C]
NRTL	Non-Random Two Liquid	-
Vfa	Vitesse faciale de l'air	[m/s]
H _{thr}	Hauteur théorique du conduit de fumées	[m]
T _{air}	Température de l'air extérieur	[°C]
Ar	Nombre d'Archimède	-
Cp	Chaleur spécifique massique	[Kcal/kg]
CS	Chao Seader	-
Ha	Hauteur de l'avaloir	[m]
Hc	Hauteur du conduit de fumées	[m]
Hf	Hauteur foyer	[m]
Hm	Hauteur du mobilab	[m]
Lf	Largeur foyer	[m]
Me	Débit volumique d'eau	[L/h]
Gr	Grashof	-
GS	Grayson Streed.	-
Pr	Prandtl	-
Re	Reynolds	-
UA	Coefficient de transmission de chaleur	[KJ/C.h]
Vb	Volume du ballon d'eau chaude	[L]
Vc	Volume du conduit de fumées	[m ³]
A ₁	Surface d'échange lors de la désurchauffe	[m ²]
A ₂	Surface d'échange lors de la condensation	[m ²]
A ₃	Surface d'échange lors du refroidissement	[m ²]
F ₁	Force résultante de la pesanteur et de la poussée d'Archimède	[N]

F_2	Résultante des forces de frottement	[N]
H_1	Hauteur de la partie supérieure du décanteur	[m]
H_2	Hauteur de la partie inférieure du décanteur	[m]
Q_1	Chaleur de désurchauffe	[KWh/jr]
Q_2	Chaleur de condensation	[KWh/jr]
Q_3	Chaleur de refroidissement	[KWh/jr]
T_2	Température de sortie du condensât	[°C]
U_1	Coefficient d'échange de chaleur lors de la désurchauffe	[kJ / h. m ² . °C]
U_2	Coefficient d'échange de chaleur lors de la condensation	[kJ / h. m ² . °C]
U_3	Coefficient d'échange de chaleur lors du refroidissement	[kJ / h. m ² . °C]
A	Surface d'échange globale	[m ²]
D	Diamètre interne du tube	[m]
H	Hauteur Totale du décanteur	[m]
L	Longueur du tube serpentin	[m]
N	Nombre de ventilateurs	-
P	Profondeur foyer	[m]
Q	Pouvoir calorifique de la biomasse	[Kcal/h]
V	Volume du décanteur	[m ³]
W	Débit de vapeur	[L/h]
h_{air}	Coefficient de convection de l'air à 20°C	[J/m ² . h. °C]
h_1	Coefficient de convection de la vapeur/l'eau dans le tube	[J/m ² . h. °C]
h_2	Coefficient de convection de la vapeur lors de la condensation	[kJ/ h. m ² . °C]
h_3	Coefficient de convection de la vapeur lors du refroidissement	[kJ/ h. m ² . °C]
d_g	Diamètre de la particule	[m]
d_{min}	Diamètre minimum de la gouttelette	[m]
r_a	Coefficient du film extérieur	[hm ² °C / kcal]
r_d	Coefficient d'encrassement	[hm ² °C / kcal]
r_i	Coefficient du film interne	[hm ² °C / kcal]
r_m	Résistance au transfert due au métal	[hm ² °C / kcal]
t_s	Temps de séjour de l'eau dans le ballon	[s]
v_p	Vitesse de la particule	[m/s]
d	Diamètre de courbure interne entre les tubes	[m]
l	Longueur d'un demi-tube	[m]
l'	Longueur d'un demi-tube	[m]
g	Accélération de la pesanteur	[m/s ²]
n	Nombre de rangées	-
t	Temps de vaporisation le l'eau dans le ballon	[s]

A. Présentation de l'unité d'extraction

Comme nous l'avons vu, une unité d'extraction classique consomme beaucoup d'énergie, d'eau, et utilise généralement des sources d'énergie fossiles (fioul, gaz naturel, etc.).

Notre but est donc de remédier à ces inconvénients, et ce, en ayant une unité remplissant les objectifs suivants :

- Energétiquement autonome ;
- Utilisant des sources d'énergie disponibles, propres et renouvelables ;
- Econome 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 de la vapeur.
- Le cohobage pour économiser de l'eau, et éviter le rejet dans la nature d'une eau contenant des quantités d'huiles essentielles dont certains constituants peuvent se révéler toxiques par effet de concentration s'ils sont faiblement biodégradables.

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 ;
- Eviter 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.

Notre Mobilab sera aménagé dans un container de semi remorque, on se propose trois types de Mobilab, selon les quantités d'huiles que l'on veut extraire :

- Un petit aménagé dans un container 20 pieds.
- Un moyen aménagé dans un container 30 pieds.
- Un grand aménagé dans un container 45 pieds.

Caractéristiques et dimensions des containers :

Tableau 24 : Dimension d'un container 20 pieds (6.09m) [52]

Container 20' pieds		
	Dimensions Intérieures	Longueur 6.00 m
		Largeur 2.30 m
		Hauteur 2.40 m
	Ouverture de Portes	Largeur 2.286 m
		Hauteur 2.278 m
	Poids du Tare	1 900 kg
Capacité en Volume	33.12 m ³	
Capacité de Chargement	22 100 kg	

Tableau 25 : Dimension d'un container 30 pieds (9.15m) [52]

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 en Volume	49.68 m ³	
Capacité de Chargement	24 749 kg	

Tableau 26 : Dimension d'un container 45'pieds (13.7m) [52]

Container 45' pieds		
	Dimensions Intérieures	Longueur 13.70 m
		Largeur 2.40 m
		Hauteur 2.60 m
	Ouverture de Portes	Largeur 2.340 m
		Hauteur 2.585 m
	Poids du Tare	4110 kg
Capacité en Volume	85.5 m ³	
Capacité de Chargement	28 390 kg	

Chaque Mobilab contiendra :

- Une chaudière ;
- Un silo ;
- Des caissons mobiles (extracteur) ;
- Un Condenseur ;
- Des décanteurs ;
- Une installation photovoltaïque ;
- Deux pompes ;
- Une citerne d'eau.

De plus, nous aurons 2 échelles, 2 portes, 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 un indicateur de niveau d'eau pour contrôler le débit et éviter toute surpression.

Pour chaque Mobilab, nous devons choisir :

- Un débit de vapeur journalier.
- Une quantité de matière végétale pour l'extraction.
- Une quantité de biomasse résiduelle à brûler.

On se fixe, pour le Mobilab moyen, un objectif de 800 kg de matière végétale par jour pour l'extraction, avec 800 L de vapeur par jour, pour huit heures de travail, à savoir 100 L/h, et ce en deux manipulations. La moitié de la matière végétale résiduelle sera utilisée comme biomasse à brûler. Le tableau suivant résume les débits de vapeur et de matière pour chaque Mobilab.

Tableau 27 : Débits de vapeur et de matière pour chaque Mobilab

	Petit Mobilab	Moyen Mobilab	Grand Mobilab
Débit de vapeur (L/jr)	400	800	1600
Matière végétale à traiter (kg/jr)	400	800	1600
Biomasse à brûler (kg/jr)	200	400	800

Pour la première manipulation, on aura besoin d'un apport de biomasse externe. On pourra utiliser des déchets, du foin, des copeaux de bois, etc. Par la suite, après chaque extraction qui devrait durer environ 4h, on utilisera la matière végétale résiduelle de la première extraction comme biomasse à brûler pour l'extraction suivante.

B. Chaudière

I. Dimensionnement de la chaudière :

Au lieu d'utiliser une chaudière à vapeur, on utilisera une cheminée en brique réfractaire avec un foyer fermé pour minimiser les pertitions de chaleur.

La construction de cheminée est soumise à des normes et réglementations qui sont [53] :

- Créer une bonne alimentation en air frais pour assurer une bonne combustion.
- Respecter le rapport entre le volume du conduit de fumées et celui du foyer. Pour les petites cheminées (volume de foyer inférieur à $0,50 \text{ m}^3$), le volume du conduit de fumées représente en général de 1,5 à 2 fois le volume de foyer, pour les cheminées plus importantes (volume de foyer supérieur à $0,50 \text{ m}^3$), le ratio est de 1 fois à 1,3 fois le volume du foyer.
- Avoir un bon dégagement de la sortie du conduit de fumées. En effet, la souche du conduit de fumée doit dépasser de 40 cm au moins le faîtage du toit.
- Respecter les normes de dimension du foyer et de l'avaloir à savoir :
 - Profondeur foyer $P = 60\%$ sa largeur L_f
 - Hauteur foyer $H_f = (L_f + P)/2$
 - Hauteur du contrecœur (Hauteur foyer + hauteur avaloir) oscille entre 1,7 et 2 fois la hauteur libre du foyer.

En respectant ces réglementations nous devons concevoir une cheminée dont la hauteur totale (Hauteur foyer + Hauteur avaloir + hauteur du conduit de fumées) ne devra pas excéder la hauteur du Mobilab de plus d'un demi mètre.

Hypothèse de construction :

- ✚ Largeur de foyer $L_f = 1,2 \text{ m}$
- ✚ Profondeur $P = 0,7 \text{ m}$
- ✚ Hauteur libre du foyer $H_f = 0,9 \text{ m}$

Ces dimensions du foyer nous donne un volume de foyer égal à $V_f = 0,756 \text{ m}^3$.

- ✚ $V_f > 0,5 \Rightarrow$ grande cheminée, ceci nous amène à supposer que le volume du conduit de fumées V_c est égal au volume du foyer V_f .
- ✚ La hauteur du contrecœur est égale à 1,7 fois la hauteur libre du foyer, donc la hauteur de l'avaloir est égale à $H_a = 0,60 \text{ m}$.
- ✚ Le conduit de fumées est un rectangle de $60 \text{ cm} \times 70 \text{ cm}$.
- ✚ La pente de l'avaloir est de $\alpha = 65^\circ$ (calculé à partir de $\tan \alpha$).
- ✚ La hauteur totale du Mobilab H_m est égale à $2,4 \text{ m}$.
- ✚ La hauteur théorique H_{thr} du conduit de fumées dont on dispose ne dépasse pas $1,90 \text{ m}$
 $H_{thr} = H_m - H_f + 0,40 = 2,40 - 0,9 + 0,4 = 1,90 \text{ m}$.
- ✚ La conduite d'air de combustion a un diamètre $\Phi = 20 \text{ cm}$

Calcul de la hauteur du Conduit d'air :

Ce calcul nous permet de savoir s'il est possible de dimensionner une cheminée ayant une:

- Hauteur du foyer $H_f = 0,9\text{m}$
- Profondeur $P = 0,7\text{m}$
- Largeur du foyer $L_f = 1,2\text{m}$
- Hauteur de l'avaloir $H_a = 0,60\text{m}$
- Pente de l'avaloir 65°

En effet On a :

$$V_f = V_c = 0,756$$

Le conduit d'air est un parallélépipède de section de base $65\text{cm} \times 70\text{cm}$

$$V_c = H_c \times 0,6 \times 0,7 \Rightarrow \quad \mathbf{H_c = 1.8\text{m}}$$

On trouve une hauteur de conduit de fumées égale à 1.8m

Donc notre cheminée peut être dimensionnée dans le Mobilab.

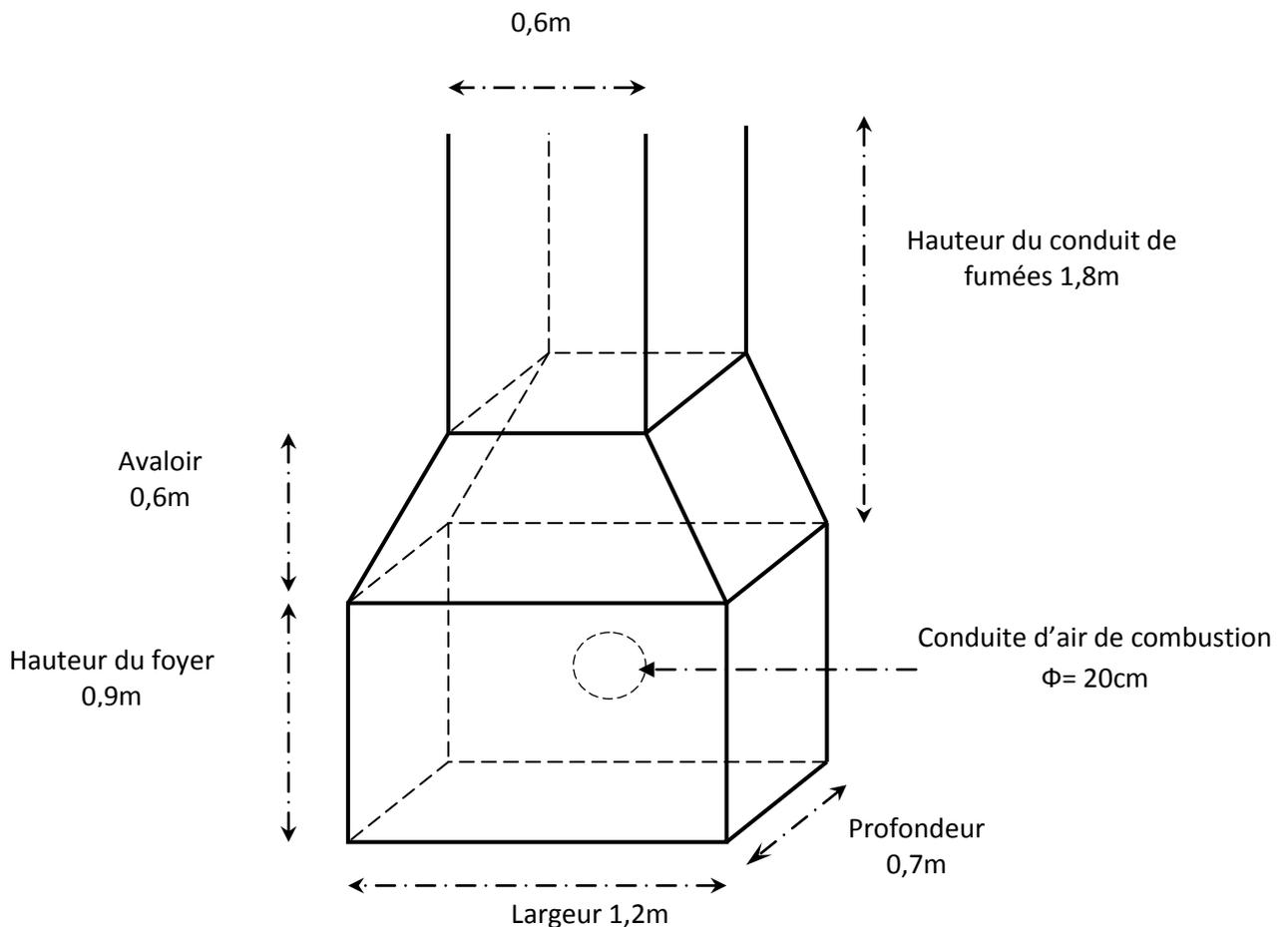


Figure 22: Vue de face cheminée en brique

II. Caractéristiques techniques de la cheminée :

II.1. Hyper structure de la cheminée :

Afin que la cheminée tienne, nous construirons sa structure en charpente métallique, avant de mettre la couverture en briques réfractaires.

La charpente est, par définition, une ossature porteuse ponctuelle. Elle peut être en bois ou métallique, mais aussi en béton armé. Dans notre cas, nous utiliserons de la charpente métallique, car, en plus d'être légère, elle forme une ossature solide, précise, stable et durable. La charpente métallique sera constituée de cornières en U, en acier inoxydable, afin de bien maintenir les briques de la cheminée.

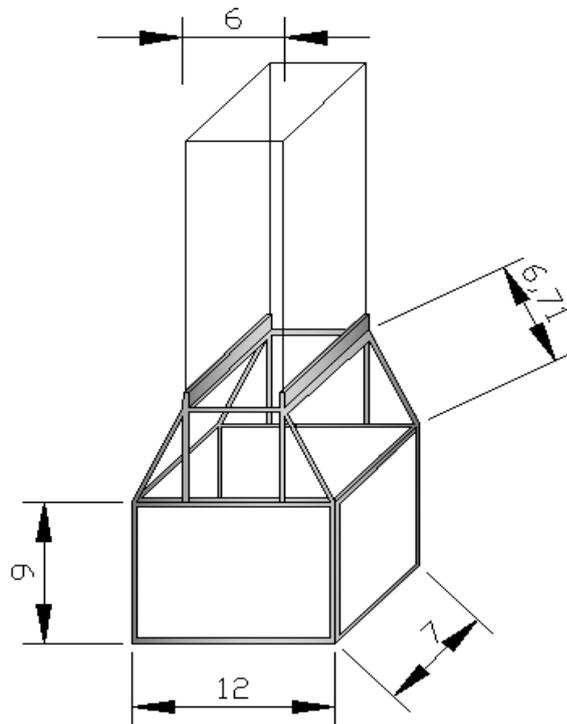


Figure 23 : Hyper structure métallique de la cheminée

II.2. Le foyer :

Le foyer est construit avec de la brique réfractaire afin de diminuer les pertes de chaleur par conduction à travers les parois et par convection.

Les caractéristiques de la brique réfractaire sont résumées dans le tableau qui suit :

Tableau 28 : Caractéristique de la brique réfractaire [54]

Dimensions	Hauteur	5 cm
	largeur	5 cm
	longueur	20 cm
Poids	0,9 kg	

Le foyer a pour dimensions 70×90×120 cm, ce qui revient à 342 briques, cependant, nous devons prévoir une ouverture pour le conduit d'aération et une pour le silo. Nous aurons donc 35 briques en moins, ce qui nous donne un total de 307 briques pour le foyer, et un poids de 276Kg.

Dans un souci de gain de place, le silo ne sera qu'un cylindre en inox, reliant la cheminée à une ouverture donnant sur l'extérieur, ce qui permet aux travailleurs d'insérer la biomasse de l'extérieur, en fournissant moins d'efforts.

II.3. L'avaloir :

Nous construisons l'avaloir en brique réfractaire. Il aura les dimensions suivantes :

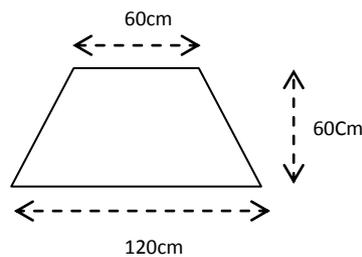


Figure a : Vue de Face

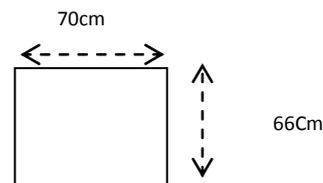


Figure b : vue de profil

Figure 24 : Dimensions de l'avaloir

La surface de l'avaloir est de 2 m², ce qui revient à 200 briques et son poids est égal à 180Kg. Une ouverture de 0,16 m² donnera accès à la grille sur laquelle repose le ballon, afin de faciliter la maintenance de ce dernier. Elle sera fermée par une plaque en inox.

II.4. Le conduit de fumées :

Le conduit de fumées sera construit avec de l'acier inoxydable. Il sera fixé en bas à l'aide de deux briques situées sur l'avaloir et en haut il sera fixé au toit avec des boulons, ce qui permet d'avoir un conduit démontable à tout moment afin de pouvoir le nettoyer.

Le tableau qui suit résume toute la technologie de la cheminée.

Tableau 29 : Caractéristiques de la cheminée

	Dimensions (m)		Nature du matériau	Poids (Kg)
Foyer	Hauteur	0,9	Brique Réfractaire	308
	profondeur	0,7		
	longueur	1,2		
Avaloir	Hauteur	0,60	Brique Réfractaire	180
	Profondeur	0,7		
	longueur	1,2		
Conduit de fumées	Hauteur	1,27	Acier inoxydable	16
	Profondeur	0,7		
	longueur	0,6		

III. 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.

- La grille sera posée sur deux supports fixés sur les murs internes du foyer. De ce fait on aura une grille glissante qui pourra être démontée à tout moment avec le ballon d'eau chaude pour effectuer des réparations ou un nettoyage.
- Le ballon d'eau chaude sera alimenté par une citerne de 300 L (diamètre 0.6m et longueur de 1m) se trouvant sur le toit.
- La vapeur sortira à travers une conduite de 30/32 mm relié au ballon.
- Une soupape de sécurité ainsi qu'un indicateur de niveau d'eau seront placés sur la cheminée et reliés au ballon d'eau chaude afin d'éviter toute surpression.

Temps de séjour et temps de vaporisation de l'eau dans le ballon :

Pour un Mobilab moyen on produit 100 L/h de vapeur, pour cela on doit brûler une quantité de biomasse égale à 50kg/h.

Un kilogramme de matière végétale brûlée produit 4,69kwh, 50kg/h brûlées produisent 234,5 kWh. Les pertes de chaleur sont estimées à 30%. Ce qui fait qu'on dispose de 164.2kwh.

Le ballon d'eau chaude est rempli aux 2/3 soit un volume d'eau $V_b = 10$ L.

$$Q = V_b/t \times \int C_p.dT,$$

$$\int C_p.dT = 673,63 \text{ kcal/kg}$$

$$t = \int C_p \times dT \cdot V/Q ;$$

$$V_b = 10 \text{ L et } Q = 39,3 \text{ kcal/h}$$

$$D'où t = 171,3s ; t = 2,85 \text{ min.}$$

En résumé il faut 2,85 min pour que l'eau commence à se vaporiser. Pour que notre installation fonctionne correctement, il faut s'assurer que le temps de séjour de l'eau dans le ballon soit supérieur au temps qu'il faut pour qu'elle se vaporise.

Pour le moyen Mobilab, le débit est de $M_e = 100$ L/h, nous aurons alors :

Temps de séjour $T_s = V_b/M_e = 6$ mn. On a donc un temps de séjour supérieur au temps de vaporisation, un ballon de 15 L est donc suffisant.

Le tableau suivant résume le temps de séjour et de vaporisation de chaque Mobilab :

Tableau 30 : Temps de séjour et temps de vaporisation de l'eau dans le ballon

	Temps de séjour de l'eau dans le ballon (mn)	Temps de vaporisation (mn)
Petit Mobilab	12	5,70
Moyen Mobilab	6	2,85
Grand Mobilab	3	1,43

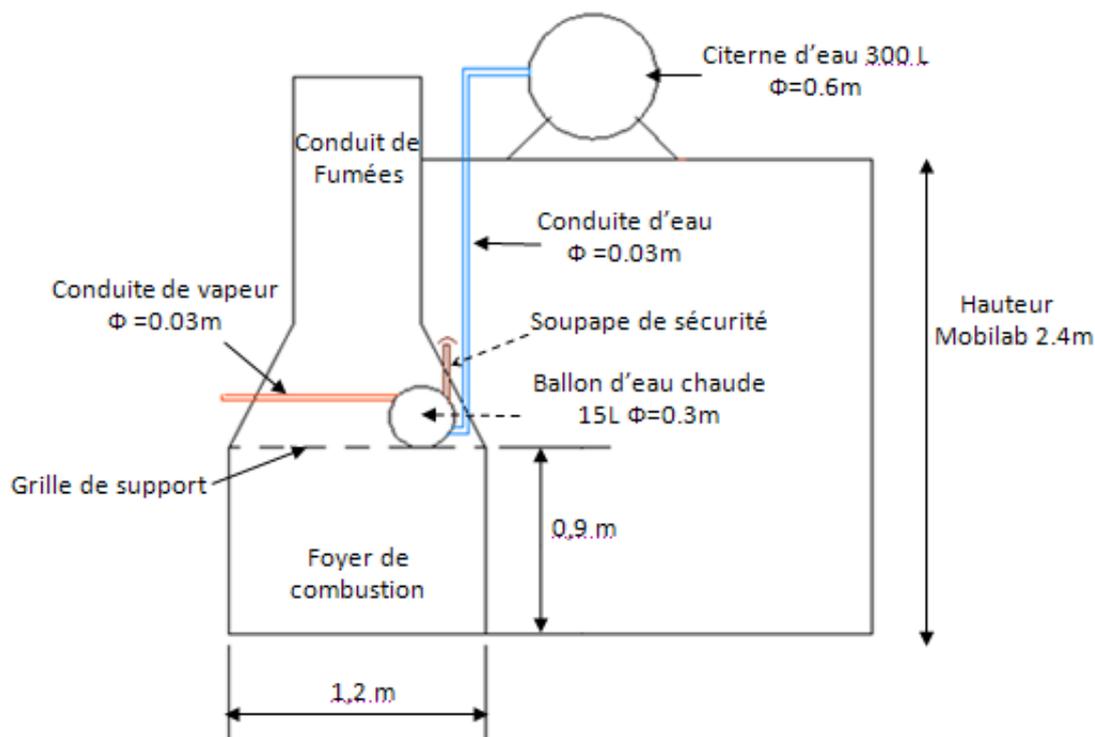


Figure 25 : Circuit de vapeur dans la cheminée

C. 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 cotés des caissons, nous feront passer la vapeur d'eau.

Les Avantages de cette technologie sont :

- Un meilleur contact entre la matière végétale et la vapeur d'eau.
- La vapeur sortante du dernier caisson sera très riche en huile essentielle.
- Manipulation des caissons facile et gain d'espace dans le Mobilab.
- Possibilité d'opérer à l'extérieur du Mobilab.
- Ils sont tractables, ce qui permet de les utiliser pour le transport de la matière végétale.
- On peut moduler la taille de notre extracteur en jouant sur le nombre de caissons utilisés.
- Facilité de vidange grâce au panier et à sa petite taille, ce qui nous permet de nous passer du palan.



Figure 26: Caissons mobiles

Figure 26: Caissons mobiles

Les caissons sont des parallélépipèdes en acier inoxydable, munis de panier à l'intérieur pour y déposer la matière végétale, d'une légère pente (2%) avec à son extrémité un petit robinet pour la vidange de l'eau condensée, et de six clapets pour avoir une bonne fermeture. Ils sont reliés entre eux et avec le Mobilab (sortie de ballon et condenseur) par des conduites 30/32 mm en PEHD, qui est un matériau plus léger et plus flexible.

La capacité d'un caisson mobile est fonction de la masse volumique de la matière végétale, pour pouvoir le dimensionner on doit connaître les valeurs de celles-ci. Le tableau qui suit nous donne la masse volumique de certaines plantes.

Tableau 31 : Masse volumique de certaines plantes [9]

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

La masse volumique moyenne de ces plantes est 170 kg/m³

Donc on peut dire que 100kg de matière végétale occuperont 0,6m³,

De ce fait un caisson mobil aura une capacité de 100 Kg avec un volume de 0,6m³ et les dimensions 1,0×0,6×1,0 (m). Le tableau qui suit résume les caractéristiques techniques d'un caisson.

Tableau 32 : Caractéristique d'un caisson mobil

Hauteur	1,0 (m)
Profondeur	0,6 (m)
longueur	1,0 (m)
Capacité	100 kg
Volume	0,60 m ³

Chaque Mobilab aura un nombre bien défini de caissons et ce selon la quantité de biomasse à traiter et le nombre de manipulation. Nous prendrons deux manipulations de 4h par jour, ce qui nous fera un total de 8 heures de travail. Le tableau qui suit nous donnera le nombre de caissons à utiliser pour chaque Mobilab.

Tableau 33 : Nombre de caissons selon le type du Mobilab

	Mobilab petit	Mobilab Moyen	Mobilab Grand
biomasse à traiter kg/ jour	400	800	1600
biomasse à traiter Kg/manipulation	200	400	800
Nombre de caissons nécessaires	2	4	8
Nombre de caissons dans le Mobilab	4	6	10

Pour plus de précautions, dans le cas d'éventuelles modifications de quantité de biomasse à traiter, ou de caissons défectueux, nous prévoyons deux caissons supplémentaires dans chaque Mobilab.

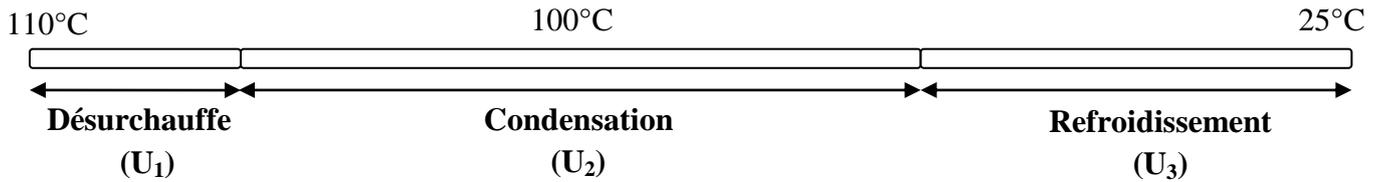
D. Le condenseur :

L'un de nos objectifs étant que notre unité soit économe en eau, plutôt que d'utiliser des condenseurs à eau classiques, nous tenterons dans cette partie d'étudier les possibilités de substituer l'eau tant que fluide de refroidissement, par l'air. Deux cas de figures seront envisagés :

- Un condenseur à l'air libre (convection naturelle, ne nécessite pas d'énergie).
- Un aérocondenseur (convection forcée, nécessite un apport énergétique).

I. Le condenseur en convection naturelle :

Afin de réaliser des économies d'énergies, nous allons analyser la faisabilité d'un condenseur fonctionnant avec de l'air en convection naturelle. Cela consiste en un serpentín en acier inoxydable, de 30 mm de diamètre intérieur et 32 mm de diamètre extérieur, fixé contre le mur du Mobilab, et ayant comme fluide refroidissant l'air ambiant. Le serpentín est constitué de trois parties distinctes, on a donc trois surfaces d'échange à calculer :



$$(1/U_i) = (1/h_{\text{air}}) + (1/h_i) \quad [10]$$

Tel que : $i = 1, 2, 3$

U_i : coefficient d'échange de chaleur.

h_{air} : coefficient de convection de l'air à 20°C. $h_{\text{air}} = 18 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$

h_i : coefficient de convection de la vapeur/l'eau dans le tube.

$$A = A_1 + A_2 + A_3$$

I.1. La partie désurchauffe : C'est le passage de la vapeur de 110°C à 100°C. Sa surface d'échange $A_1 = Q_1 / U_1 \times \text{DTLM}_1$, avec $Q_1 = 0,53 \text{ KWh/ Jr}$. Elle est négligeable devant la surface d'échange totale [11].

I.2. La partie condensation : C'est le changement d'état qui s'effectue à 100°C. Sa surface d'échange $A_2 = Q_2 / U_2 \times \text{DTLM}_2$, avec $Q_2 = 69,57 \text{ KWh/ Jr}$.

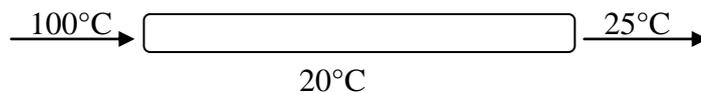
$$\text{DTLM}_2 = (T_2 - T_{\text{air}}) / 2 = (100 - 20) / 2 = 40.$$

$$(1/U_2) = (1/h_{\text{air}}) + (1/h_2) \quad \text{avec} \quad h_2 = 3050 (D/W)^{1/3} \quad [11]$$

$$h_2 = 2260 \text{ kJ/h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{°C} \quad \Longrightarrow \quad U_2 = 17,86 \text{ kJ/h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{°C}$$

$$A_2 = 287 \text{ m}^2$$

I.3. La partie refroidissement : C'est le passage de l'eau de 100°C à 25°C. Sa surface d'échange $A_3 = Q_3 / U_3 \times \text{DTLM}_3$, avec $Q_3 = 9,9 \text{ KWh/ Jr}$.



$$\text{DTLM}_3 = [(100 - 20) - (25 - 20)] / \ln [(100 - 20) / (25 - 20)] = 27,05 \text{°C}.$$

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

$$h_3 \times D / \lambda = 1,09 Y^{1/10} \quad \text{avec} \quad Y = \text{Pr} \times \text{Gr} = 2,48 \times 10^{-3} \quad [11]$$

$$h_3 = 48,11 \text{ kJ/h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{°C} \quad \Longrightarrow \quad U_3 = 13,09 \text{ kJ/h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{°C}$$

$$A_3 = 100,65 \text{ m}^2$$

I.4. Calcul de la surface d'échange et de la longueur du tube:

$$A = A_1 + A_2 + A_3 \quad \text{avec} \quad A_1 \ll A \quad \Longrightarrow \quad A = 387,65 \text{ m}^2$$

$$A = \pi \cdot D \cdot L \quad \Longrightarrow \quad L = 3856 \text{ m}$$

Il apparait clairement qu'un tel serpentin est trop long pour notre unité, et n'a pas lieu d'être. L'utilisation d'un condenseur avec de l'air en convection naturelle est donc impossible, et il nous faut lui trouver une alternative. Nous allons donc tenter d'utiliser un serpentin semblable à celui-ci, mais avec de l'air en convection forcée. C'est ce que l'on appelle un aérocondenseur.

II. Les aérocondenseurs :

Un aérocondenseur est un réfrigérant sec utilisant l'air comme fluide réfrigérant pour condenser une vapeur par convection forcée. Les aérocondenseurs usuels comportent des rangées superposées de tubes à ailettes. Un ventilateur, hélicoïde pour la plupart du temps, assure une circulation forcée d'air autour des tubes. Ils sont considérés comme des échangeurs à contre courant.

Dans un aérocondenseur, le fluide à condenser est mis en circulation par une pompe ou un ventilateur, selon sa nature, et traverse un ensemble de tubes dont la paroi extérieure est soumise à une circulation d'air naturelle ou forcée. L'adoption d'un tel système comporte un certain nombre d'avantages conduisant dans certains cas à son adoption par l'utilisateur quel que soit le fluide. On peut noter en particulier les points suivants :

- Une économie en eau, puisque l'on utilise comme fluide réfrigérant de l'air.
- La séparation totale des fluides conserve la qualité du fluide à refroidir, et protège l'air de la pollution.
- Il est particulièrement adapté au refroidissement des fluides sans limite de température.

Leur utilisation principale se situe dans le domaine de la production d'énergie [centrales électriques de faible et moyenne puissance (< 100 MW)] lorsque le réfrigérant atmosphérique, associé à un condenseur classique ne peut être utilisé, par exemple, par manque d'eau d'appoint.

Les aérocondenseurs présentent aussi quelques inconvénients, tels que l'encombrement de l'installation, le prix élevé de l'appareil et des frais de fonctionnement (du aux puissances de ventilation nécessaire), et l'impossibilité d'obtenir de basses températures d'eau refroidie (la limite théorique est celle de l'air ambiant) [39].

Dans un souci de gain de place et d'argent, nous n'utiliserons pas un aérocondenseur classique mais un serpentin en acier inoxydable, de 30 mm de diamètre intérieur et 32mm de diamètre extérieur, fixé contre le mur du Mobilab, avec, en fonction de la surface d'échange, un certain nombre de ventilateurs disposés en face pour brasser l'air et obtenir une convection forcée. Notre aérocondenseur fonctionnera donc comme un aérocondenseur classique, mais sera moins encombrant, et moins cher.

I.1. Partie simulation :

I.1.1. Introduction :

La simulation des procédés nous permet le plus souvent de résoudre les problèmes de calcul manuel long, ainsi que de simuler des phénomènes physiques complexes. Elle repose sur la mise en œuvre de modèles théoriques utilisant souvent la technique dite des éléments finis.

Elles sont donc une adaptation aux moyens numériques de la modélisation mathématique, et servent à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution.

Sur le marché on trouve différents logiciels de simulation tels que : Aspen plus, Hysim, ChemCad, Hysys...etc.

I.1.2. Présentation du logiciel Hysys :

Le simulateur Hysys est un logiciel de simulation de procédés du génie chimique développé par la société Hyprotech (Canada)

Il est souvent utilisé lors de la conception d'un procédé industriel afin de :

- Dimensionner les équipements utilisés dans les procédés industriels.
- Etablir les bilans de matière ainsi que les bilans de chaleur et d'échange d'énergie.
- Déterminer les performances des équipements utilisés.
- Faire le suivi des procédés.
- Réajuster les paramètres de fonctionnement dans le cas de changement de composition ou des conditions initiales.
- Simuler tout un procédé, une partie d'un procédé ou un équipement.

I.1.3. Simulation de l'aérocondenseur :

Dans la partie qui suit, nous simulerons le fonctionnement d'un aérocondenseur utilisant de l'air pour condenser le mélange vapeur/huile essentielle et l'amener à l'état liquide pour pouvoir le séparer.

- La proportion de l'huile dans la vapeur est très petite voir négligeable, ce qui nous amène à considérer que le mélange vapeur d'eau/huile essentielle est de la vapeur d'eau pure.
- La vapeur sera admise à 110°C, elle sort sous forme d'eau liquide à 25°C
- La température de l'air ambiant est prise à 20°C.

-Choix du système d'unité :

La première étape consiste à choisir le système d'unité, dans notre cas on prend le système SI (Système International)

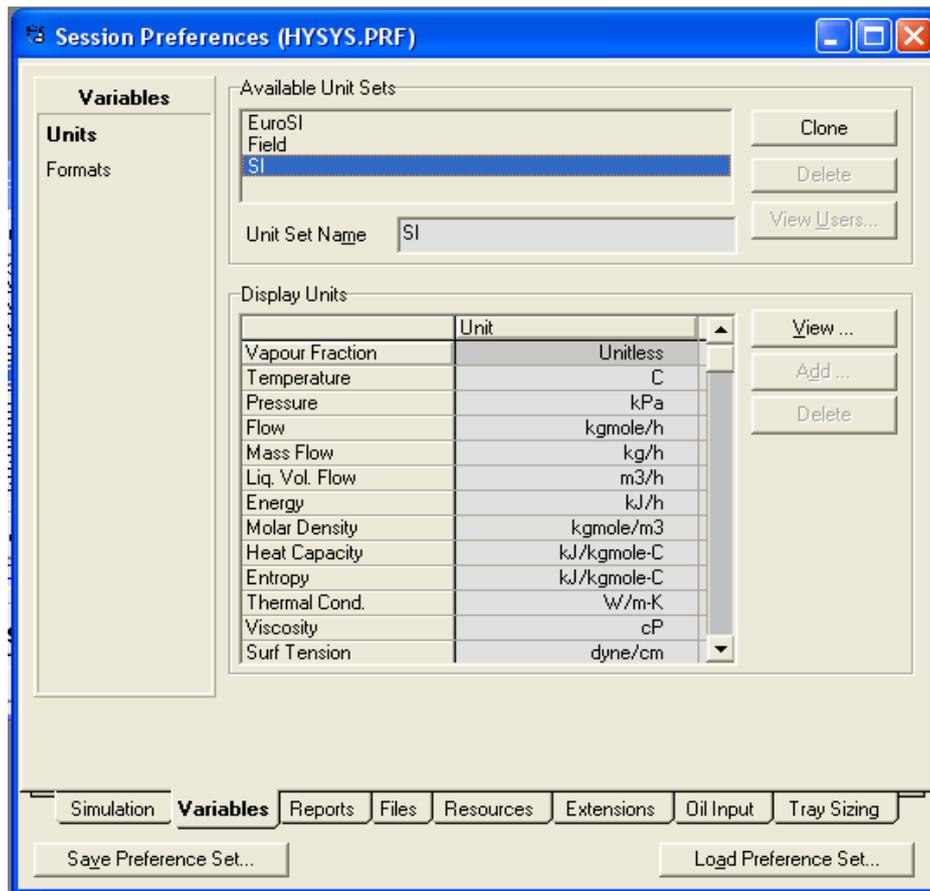


Figure 27 : Choix du système d'unité sur Hysys

-Considération thermodynamique :

Tout système ou processus est régi par un modèle thermodynamique. Le tableau qui suit regroupe différents modèles selon le type de système.

Tableau 34 : Choix du model thermodynamique en fonction du système

Type de système	Model
Systèmes binaires	Margules, Van Laar, NRTL
Tour d'éthylène	Lee Kesler Plocker
Equilibre liquide-liquide	NRTL, Wilson, Van Laar
Systèmes à H ₂	GS
Vapeur	CS ou GS
Hydrocarbures légers	CS
Hydrocarbures lourds	Antoine
Systèmes Azéotropique	NRTL

NRTL : Non-Random Two Liquid

GS : Grayson Streed.

CS : Chao Seader.

Le model thermodynamique le plus adapté à notre cas, à savoir la condensation de la vapeur d'eau est le model de Chao Seader qui est un model très applicable pour les systèmes comprenant majoritairement de l'eau en phase liquide et en phase vapeur.

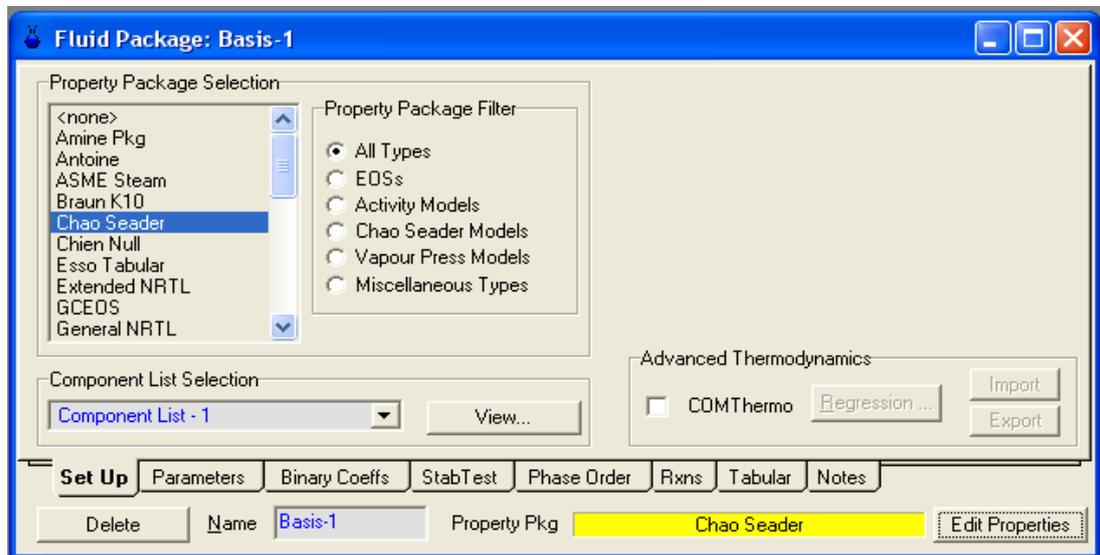


Figure 28 : Choix du model thermodynamique sur Hysys

-Choix des composés du procédé :

Comme nous l'avons dit précédemment, notre système sera assimilé à de la vapeur d'eau qui se condense de 110°C à 25°C. on prend 110°C pour nous placer dans le cas le plus défavorable.

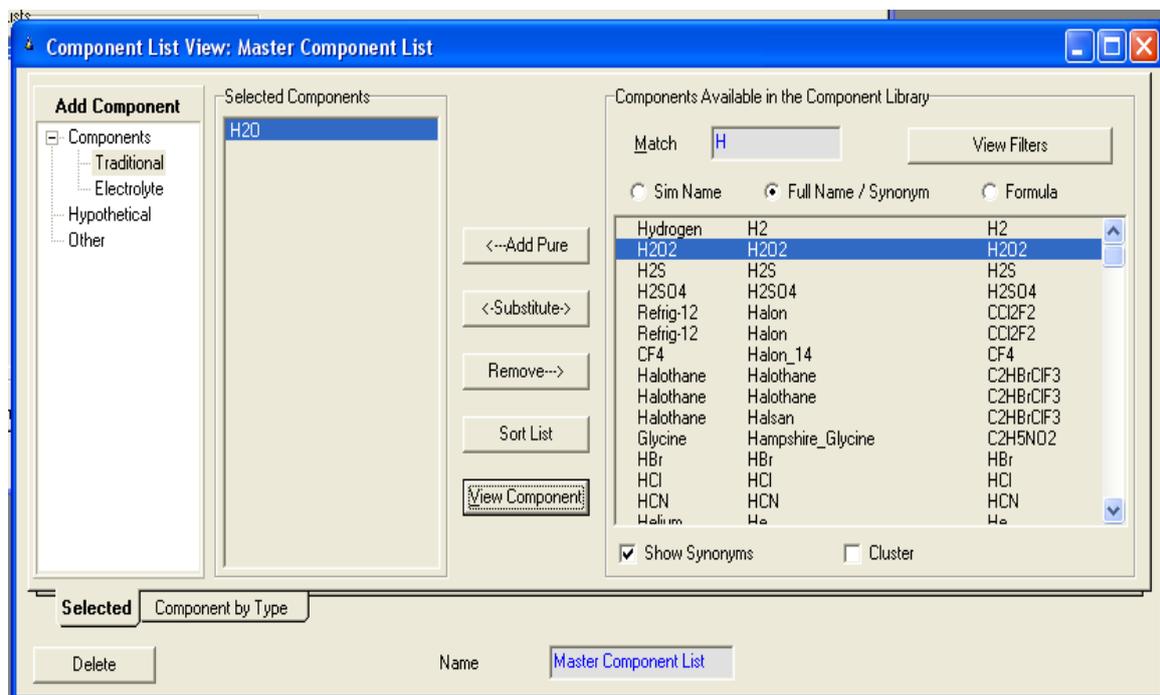


Figure 29 : Choix des composés du procédé sur Hysys

Note : le procédé choisi se passe sans réaction chimique, le seul phénomène qui a lieu est un changement d'état, d'un état vapeur à un état liquide.

-Composition du courant d'entrée (vapeur) :

Le courant d'entrée est composé de 100% de vapeur d'eau admise à 110°C.

Tableau 35 : Composition du courant d'Entrée

Fraction de vapeur	100%
Fraction liquide	0
Température °C	110
Pression KPa	100
Débit de vapeur Kg/h	100
composition	100%eau état vapeur

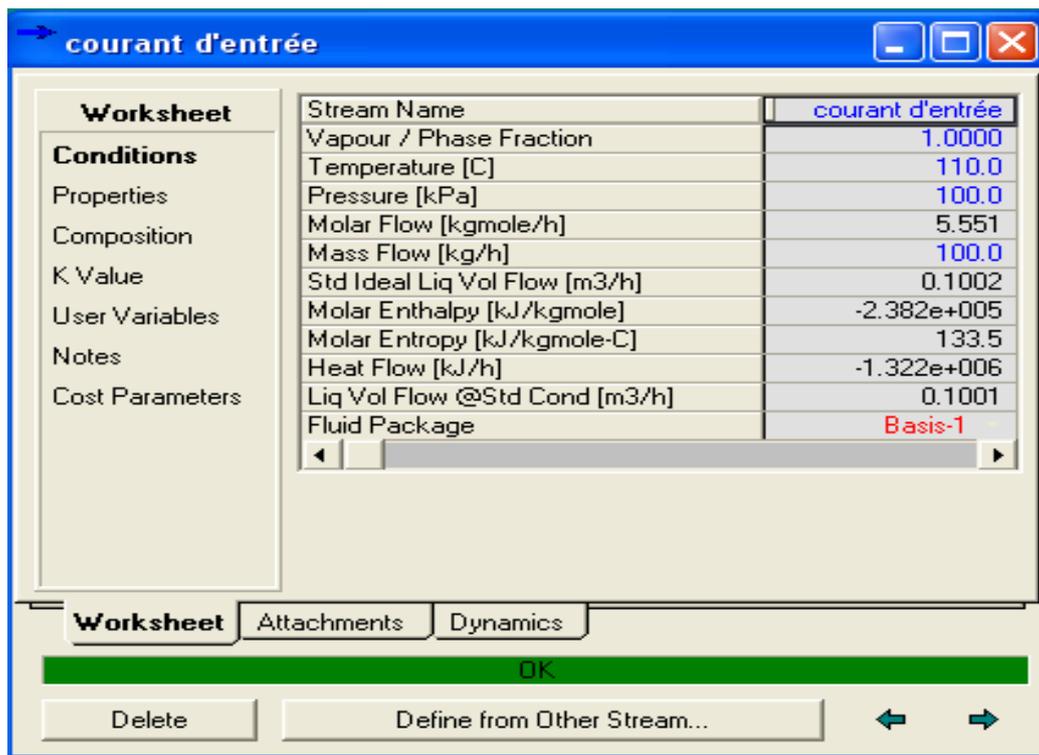


Figure 30 : Tableau de composition du courant d'entrée de l'aérocondenseur sur Hysys

-Composition du courant de sortie :

On admettra que le courant de sortie est composé de 100% d'eau à l'état liquide, sortant à une température de 25°C

Tableau 36 : Composition du courant de sortie

Fraction de vapeur	0%
Fraction liquide	100%
Température °C	25
Pression KPa	99
Débit de vapeur Kg/h	100
composition	100%eau état liquide

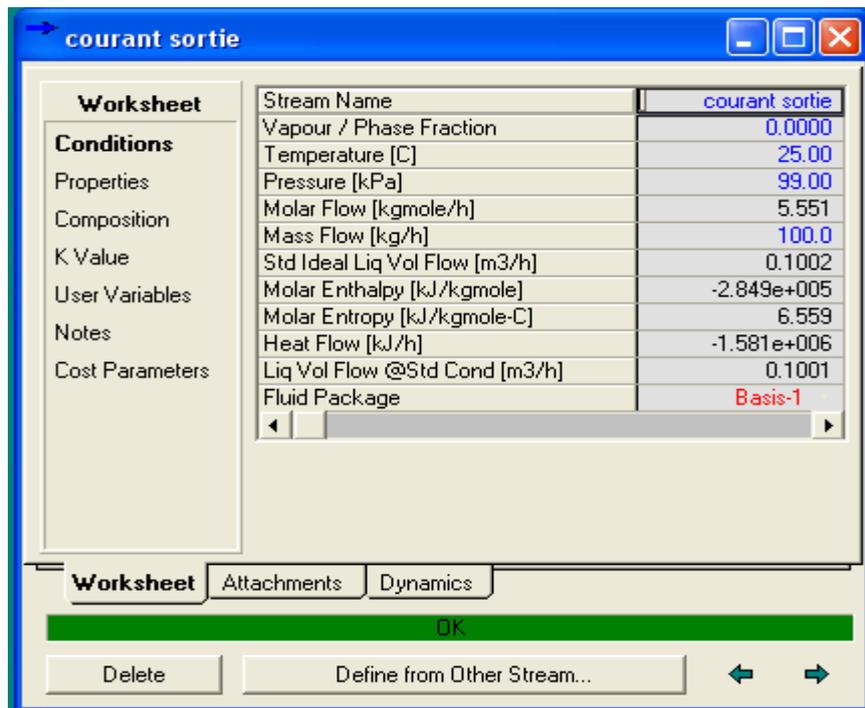


Figure 31 : Tableau de composition du courant de sortie sur Hysys

-Résultat de la simulation de l'aérocondenseur :

Pour un débit de vapeur de 100 Kg/h, le logiciel nous donne des résultats selon le débit d'air qui passe à travers les ventilateurs de l'aérocondenseur.

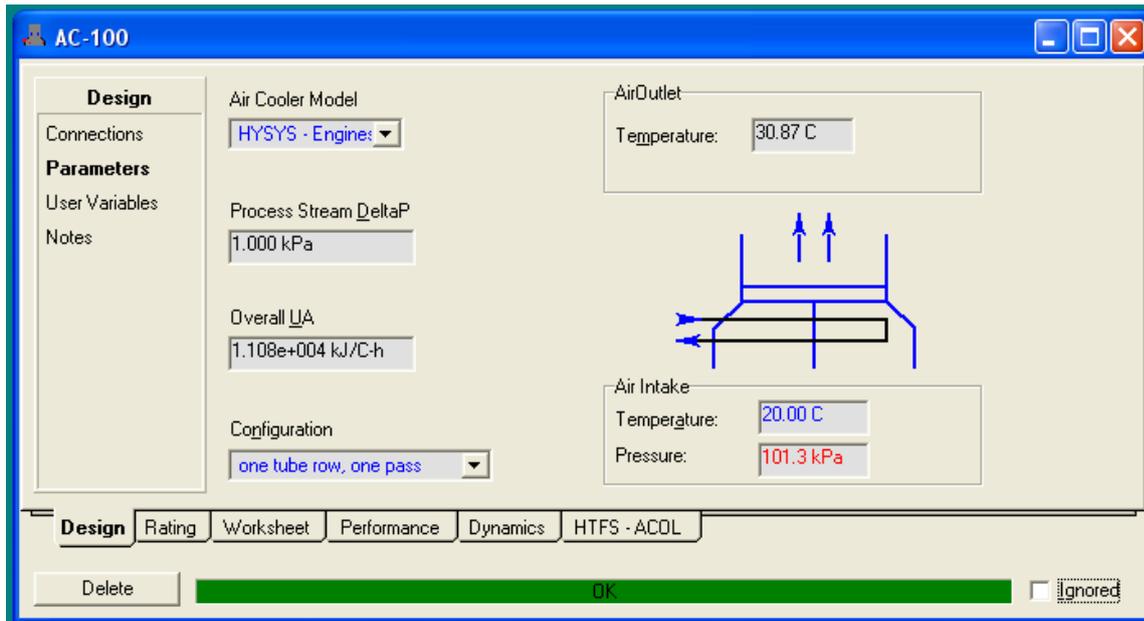


Figure 32 : Résultat de la simulation de l'aérocondenseur

Tableau 37 : Influence du débit d'air sur le coefficient d'échange UA pour un débit de vapeur de 50Kg/h

Débit de vapeur 50 kg/h				
Débit de d'air M ³ /h	T sortie air (°C)	Vitesse du moteur tr/min	UA KJ/C.h	DTLM (°C)
5000	42,15	100	8313,99	24,25
7500	34,59	100	6177,52	26,13
10000	30,87	100	5540,91	27,04
20000	25,39	100	4856,68	28,37

Tableau 38 : Influence du débit d'air sur le coefficient d'échange UA pour un débit de vapeur de 100Kg/h

Débit de vapeur 100 kg/h				
Débit d'air m ³ /h	T sortie air (°C)	Vitesse du moteur tr/min	UA KJ/C.h	DTLM (°C)
40000	25,99	100	9713,36	28,37
30000	27,20	100	10114,64	27,93
20000	30,87	100	11081,83	27,04
10000	42,15	100	16628,01	24,25

Tableau 39 : Influence du débit d'air sur le coefficient d'échange UA pour un débit de vapeur de 200Kg/h

Débit de vapeur 200 kg/h				
Débit de d'air M ³ /h	T sortie air (°C)	Vitesse du moteur tr/min	UA KJ/C.h	DTLM (°C)
40000	30,87	100	22163,66	27,04
36000	32,10	100	22931,66	26,74
30000	34,59	100	24710,12	26,13
20000	42,15	100	33256,02	24,25

Pourquoi s'est on fixé une vitesse de 100 tr/min ? Pour un débit de vapeur égale à 100 kg/h et un débit d'air brassé de 20 000 m³/h, on opère sous différentes vitesses. Les résultats sont résumés dans le tableau qui suit :

Tableau 40 : Influence de la vitesse de rotation du moteur du ventilateur sur la température de sortie de l'air

Vitesse du moteur tr/min	UA KJ/C.h	T sortie air (°C)
100	11081,83	30,87
200	16628,01	42,15
500	180359,84	78,85
1000	-4175889,31	149,5

Lorsqu'on augmente la vitesse de ventilation la température de sortie de l'air augmente, ce qui n'arrange pas l'utilisateur, car la température admissible pour le travail ne doit pas excéder 40°C.

II.2. Calcul de la surface d'échange nécessaire pour condenser la vapeur:

Le logiciel Hysys nous donne le coefficient de transmission de chaleur multiplié par la surface AU (Overall).

Afin de calculer la surface qu'il faut pour refroidir la vapeur, il nous faut estimer le coefficient d'échange global de chaleur U.

Le coefficient d'échange global U (kcal / h.m².°C) de l'aérocondenseur est déterminé par la Relation suivante :

$$\frac{1}{U} = r_i + r_m + r_a + r_d \quad [7]$$

r_m : Résistance au transfert due au métal le plus souvent égale à 0.00015 (hm² °C / kcal)

r_a : Coefficient du film extérieur (air)

r_d : Coefficient d'encrassement.

r_i : Coefficient du film interne.

Pour la vapeur d'eau $r_i=0,0002$; $r_d = 0,0001$; $r_m =0,00015$.

Estimation de r_a :

À partir du tableau, on trace une courbe $V_{fa} = f(r_a)$.

Tableau 41 : aérocondenseurs, coefficient du film en fonction de la vitesse de l'air [7]

Coefficient de film extérieur r_a (h.m ² .°C/kcal)	Vitesse faciale de l'air V_{fa} (m/s)
0,00096	3,20
0,00102	3,02
0,00107	2,87
0,00112	2,74
0,00118	2,58
0,00121	2,48
0,00125	2,38
0,00128	2,26
0,00132	2,16

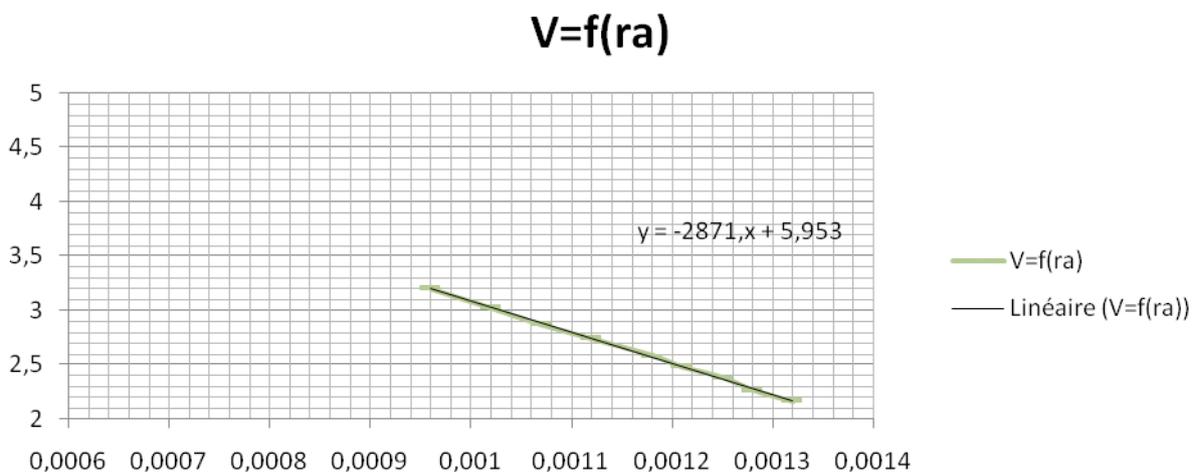


Figure 33 : Courbe de la vitesse de l'air en fonction du coefficient r_a

La courbe tracée est une droite d'équation : $V_{fa} = - 2871 + 5.9 r_a^3$

D'un autre côté, on a $V_{fa} = \text{Débit air} / \text{Surface ventilateur}$.

Débit de l'air: 2500 m³/h.

Surface ventilateur: $\pi/4 \times (0,46)^2$

$$V_{fa} = 4.18 \text{ m/s}$$

Une fois la vitesse calculée, on peut utiliser l'équation obtenue de la courbe $V_f = f(r_a)$ pour calculer la valeur du coefficient du film extérieur (air) r_a lorsque $V_f = 4.18 \text{ m/s}$

Cela nous donne une valeur de : $r_a = 0.00062$

$$\frac{1}{U} = 0.0001 + .0002 + 0.00062 + 0.00015$$

$$\frac{1}{U} = 0.00107 \Rightarrow U = 934.58 \text{ kcal/h.m}^2.\text{°C}$$

$$U = 3905.54 \text{ KJ/h.m}^2.\text{°C}$$

- Pour un débit de vapeur de 100 kg/h :

$$AU = 11081,83 \text{ KJ/C.h} \Rightarrow A = 2.84 \text{ m}^2.$$

La surface d'échange est égale à $A = 2.84 \text{ m}^2$.

Le débit d'air Total brassé pour 100 kg/h de vapeur est de 20 000 m^3/h , ce qui signifie qu'on dispose de 8 ventilateurs de 2500 m^3/h chacun étalés sur deux rangés.

La surface d'échange est la surface d'un serpentin, soit un tube cylindrique d'un diamètre D et une longueur L sa surface serait égale $A = \pi.D.L$

Pour notre tuyauteries on se fixe un diamètre $D = 0.0032 \text{ m}$, similaire à celui utilisé pour la distribution du gaz naturel.

$$L = \frac{2.84}{\pi 0,032} = 28.26 \text{ m}.$$

Entre deux ventilateurs on laisse 0,3 cm d'espace.

Le diamètre de chaque ventilateur est de 0,5 m.

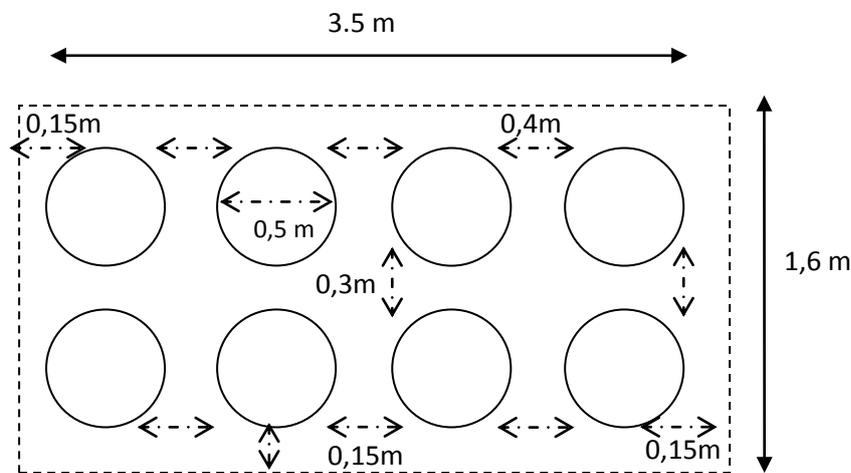


Figure 34 : disposition des ventilateurs de l'aérocondenseur

Soit le système d'équation à résoudre

$$\ell.n + \ell'(n-1) = 28,26 \text{ m}$$

$$\ell + d = 1,6 \text{ m} \Rightarrow \ell = 1,6 - d$$

$$(n-1)d + 0.032n = 3.5 \text{ m} \Rightarrow d = \frac{3.5 - 0.032n}{n-1}$$

$$\ell' = \pi \frac{D}{2} \Rightarrow \ell' = \frac{\pi 3.5 - 0.03n}{2(n-1)}$$

La résolution de ce système nous donne :

$N=16$; $d=0.2\text{m}$; $\ell'=0.32\text{m}$; $\ell=1.4\text{m}$.

Tableau 42 : Paramètres N , ℓ , ℓ' , d en fonction des différents débits de vapeur

Débit de vapeur (L/h)	Débit d'air m ³ /h	Nombre de ventilateur	Overall UA (KJ/h°C)	Surface d'échange A (m ²)	Longueur Totale du serpentin (m)	Nombre de rangé n	Diamètre interne d (m)	Longueur du demi tube l' (m)	Longueur du tube l (m)
50	10 000	4	5540.92	1.42	14.13	8	0.2	0.36	1.4
100	20 000	8	11081,83	2.84	28.26	16	0.2	0.36	1.4
200	40 000	16	22163.66	5.68	56.52	32	0.2	0.36	1.4

*pour le débit de vapeur de 50 L/h, on prendra 4 ventilateurs espacés de 0,3 m étalés sur deux rangés de deux ventilateurs chacun.

*pour le débit de vapeur de 200 L/h, on prendra 16 ventilateurs espacés de 0.3 m étalés sur deux rangés de 8 ventilateurs chacun.

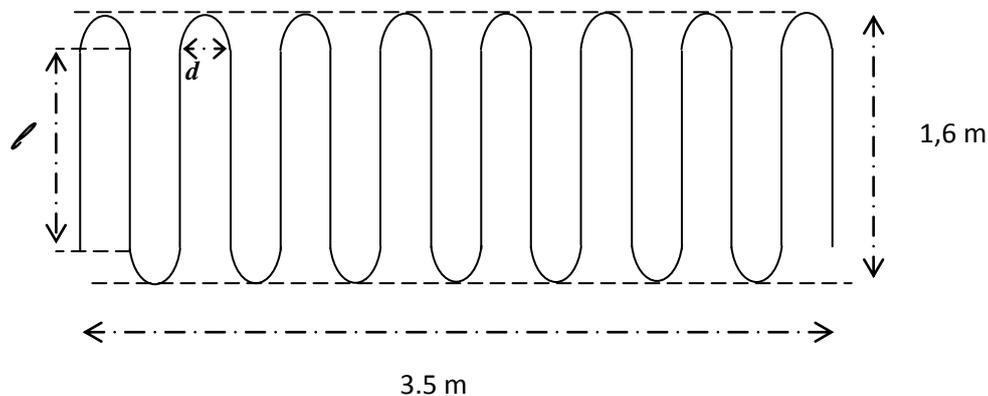


Figure 35 : Schéma du serpentin

III. Conclusion :

A l'issue de ces deux dimensionnements, on constate que seul le condenseur en convection forcée peut être adapté à notre Mobilab. Nous aurons donc une partie du mur du Mobilab consacrée au condenseur. On accrochera les ventilateurs au mur, et on y fixera le serpentin, à 20cm des ventilateurs. Pour les alimenter, nous aurons besoin d'électricité. A cet effet, nous tenterons de placer des panneaux solaires photovoltaïques, afin que notre unité soit énergétiquement autonome.

E. Décanteur :

I. Comportement du mélange dans le 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. En fonction de sa densité, l'huile peut être au dessus ou au dessous de la phase d'hydrolat. Cependant, nous constatons que la majorité des huiles susceptibles d'être extraites au sein du Mobilab sont de densité inférieure à celle de l'eau (voir tableau 43). Nous devons donc dimensionner un décanteur ou essencier pour essences légères, où l'huile essentielle est au dessus de l'hydrolat.

Tableau 43 : Densité et Viscosité de quelques huiles essentielles [9,39]

Huiles essentielles	Viscosité à 20°C (mPa.s)	Densité (g / cm ³)
Patchouli	21,00	0.955-0.963
Menthe	7,70	0.889-0.908
Palma Rosa	7,33	0.880-0.854
Gingembre	5,63	0.872-0.884
Carotte	4,72	0.900-0.945
Géranium	4,48-6,13	0.883-0.905
Coriandre	3,50	0.862-0.878
Néroli	3,00	0.866-0.871
Lavande	2,92	0.880-0.890
Anis vert	2,85	0.980-0.990
Eucalyptus	2,64	0.860-0.870
Lemon-grass	2,62	0.879-0.901
Camomille	2,62	0.900-0.920
Bergamote	1,96	0.876-0.884
Estragon	1,84	0.918-0.943
Angélique (racines)	1,75	0.856-0.915
Citron	1,05	0.853-0.859
Mandarine	1,01	0.848-0.855
Orange douce	0,93	0.840-0.844

I.1. Vitesse d'ascension de la gouttelette de quelques huiles essentielles :

Les dimensions du décanteur dépendent de la vitesse d'ascension des gouttelettes d'huiles essentielles. Celle-ci dépend du nombre d'Archimède « Ar ». Nous avons alors trois domaines de variations de la vitesse d'ascension :

- $Ar < 30$ Régime laminaire;
- $30 < Ar < 100\ 000$ Régime intermédiaire;
- $Ar > 100\ 000$ Régime turbulent.

Le nombre adimensionnel d'Archimède « Ar » quand à lui dépend de différents paramètres liés à la nature de l'huile et aux forces de gravité et de frottement visqueux, et qui sont traduits par la formule suivante [13]:

$$Ar = d_g^3 \cdot g \cdot (\rho_2 - \rho_1) \cdot \rho_1 / \mu^2$$

Avec : ρ_2 et ρ_1 les masses volumiques respectives de la phase lourde et de la phase légère ;
 d_g : le diamètre de la particule ;
 μ : la viscosité de l'eau ;
 g : la pesanteur.

I.2. Forces agissant sur la vitesse d'ascension de la gouttelette d'huile essentielle :

On considère une émulsion en repos dans un récipient. Cette émulsion est constituée d'un mélange d'huile essentielle et d'eau [12].

La phase continue (eau) est caractérisée par :

- Sa masse volumique ρ_2 ;
- Sa viscosité dynamique η ;

La phase dispersée (huile essentielle) est caractérisée par :

- Sa masse volumique ρ ;
- Son volume V ;
- La dimension des gouttelettes;

Une gouttelette est soumise :

- A une force F_1 qui résulte de la force de pesanteur et de la poussée d'Archimède, tel que:

$$\vec{F}_1 = v \times (\rho_2 - \rho_1) \times \vec{g}$$

- A une force F_2 qui est la résultante des forces de frottement qui tendent à s'opposer au déplacement de la gouttelette, elle dépend de :

- La vitesse d'ascension des gouttelettes ;
- De ses dimensions ;
- La viscosité de la phase continue ;
- La masse volumique de la phase continue.

Cette force de résistance F_2 augmente en fonction de la vitesse des gouttelettes en émulsion, jusqu'à une limite telle : $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$.

A cette limite correspond une vitesse v de la gouttelette qui est la vitesse avec laquelle elle atteint la surface de séparation.

Toute gouttelette en suspension dans un fluide subit une force de pesanteur qui tend à l'entraîner vers le bas ; lorsque cette force est supérieure à la force de poussée d'Archimède exercée par le fluide en sens contraire, les gouttelettes d'eau se rassemblent dans la partie inférieure de l'appareil, on peut théoriquement obtenir la séparation complète des deux phases s'il s'agit d'une émulsion de deux liquides, on parle alors de « séparation par décantation en phase lourde et en phase légère » [13].

I.3. Vitesse d'ascension de la gouttelette pour une faible concentration d'huile :

La vitesse d'ascension dépend du régime d'écoulement de la gouttelette dans l'émulsion. Ce régime d'écoulement est caractérisé par le nombre de Reynolds, et on distingue alors les régimes suivants [12]:

- Régime brownien pour $Re < 10^{-4}$:

Le diamètre des gouttelettes est trop petit, car les gouttelettes sont trop fines.

- Régime laminaire pour $10^{-4} \leq Re < 2$:

La vitesse d'ascension des gouttelettes s'écrit : $v = d^2 \cdot (\rho_2 - \rho_1) \cdot g / 18 \eta$

- Régime intermédiaire pour $2 \leq Re < 500$:

La vitesse d'ascension des gouttelettes s'écrit : $v = Re \cdot \mu / d \cdot \rho_1$

- Régime turbulent pour $Re > 500$:

La vitesse d'ascension s'écrit : $v = \sqrt{3 \cdot d \cdot g \cdot (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2}$

Dans le cas d'une suspension diluée (concentration de l'huile inférieure à 0.5%), on considère que chaque gouttelette est suffisamment éloignée de sa voisine, et que par conséquent chacune d'entre elles décante comme une particule isolée.

En appelant d_g le diamètre de la particule, et ξ est le coefficient de résistance qui dépend de Re , la condition d'équilibre s'écrit :

$$\pi \cdot g \cdot d_g^3 \cdot (\rho_2 - \rho_1) / 6 = \pi \cdot d_g^2 \cdot v^2 \cdot \xi \cdot \rho_1 / 8$$

On en déduit la vitesse de sédimentation v : $v = [4 \cdot g \cdot d_g \cdot (\rho_2 - \rho_1) / 3 \cdot \xi \cdot \rho_1]^{0.5}$

On pourra ainsi, en fonction de « Re » et de « Ar », trouver la vitesse d'ascension de la gouttelette pour différents régimes.

II. Représentation de la vitesse d'ascension de la gouttelette d'huile essentielle :

II.1. Régime laminaire : $Ar < 30$, $Re = Ar/18$, $\xi = 24 / Re$.

L'évolution de la vitesse en fonction du diamètre des gouttelettes est exprimée par la loi de Stokes, et représentée sur la figure suivante pour différentes huiles essentielles [16] :

$$v = d^2 \cdot (\rho_2 - \rho_1) \cdot g / 18 \eta$$

II.1.1. Représentation graphique de la vitesse d'ascension en fonction du diamètre des gouttelettes :

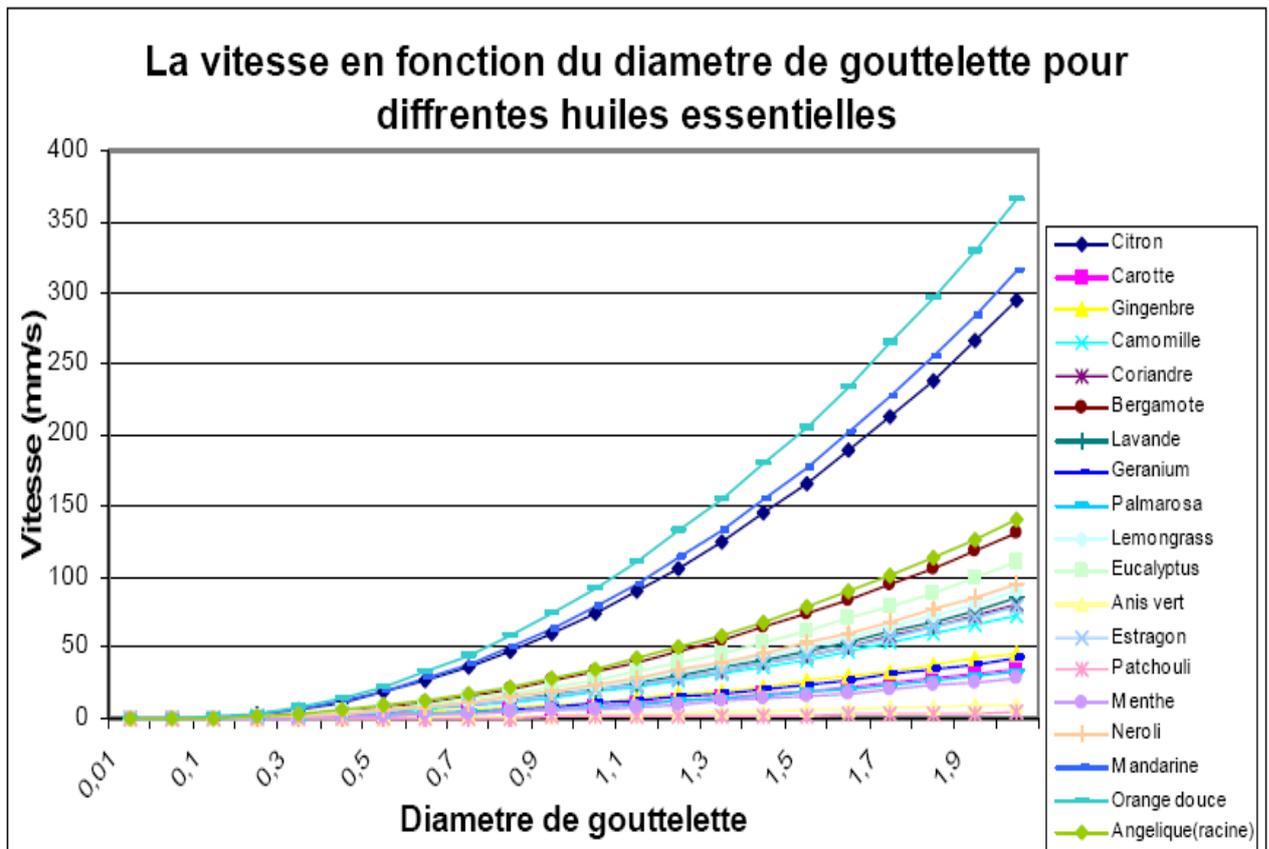


Figure 36 : Evolution de la vitesse d'ascension d'une gouttelette en fonction de son diamètre pour différentes huiles essentielles, en régime laminaire [16]

II.1.2. Interprétation du graphe :

Les courbes des différentes huiles essentielles ont la même allure générale. En effet elles sont toutes d'allures paraboliques croissantes.

Les pentes les plus importantes sont celles des huiles essentielles d'orange douce, de mandarine et de Citron qui représentent les huiles essentielles qui ont les plus faibles viscosités parmi les autres huiles essentielles, et les pentes les moins importantes sont celle du Patchouli, de la Menthe et de la Palma rosa qui ont, quant à elles, les viscosités les plus grandes, et ce car la vitesse d'ascension dépend de la viscosité de l'huile essentielle, ainsi plus la viscosité est importante plus la vitesse est faible et inversement, ce qui apparaît clairement dans la loi de Stokes.

II.1.3. Corrélations pour les différentes huiles essentielles :

La corrélation générale est de la forme : $v = a.d^2 - b.d + c$; $R^2=1$.

Les coefficients de corrélation obtenus sont regroupés dans le tableau suivant [16] :

Tableau 44: Coefficients de corrélation pour les différentes huiles essentielles, en régime laminaire [16]

Huiles essentielles	a	b	c
Patchouli	0.0101	0.0399	0.0372
Menthe	0.0071	0.2789	0.2600
Palma Rosa	0.0823	0.3252	0.3032
Gingembre	0.1158	0.4578	0.4268
Carotte	0.0863	0.3413	0.3182
Géranium	0.1065	0.4210	0.3925
Coriandre	0.1979	0.7820	0.7291
Néroli	0.2355	0.9307	0.8677
Lavande	0.2103	0.8311	0.7749
Anis vert	0.0248	0.0980	0.0913
Eucalyptus	0.2737	1.0820	1.0088
Lemon-grass	0.2240	0.8853	0.8254
Camomille	0.1825	0.7214	0.6725
Bergamote	0.3271	1.2930	1.2055
Estragon	0.1979	0.7820	0.7291
Angélique (racines)	0.3477	1.3746	1.2815
Citron	0.7348	2.9046	2.7079
Mandarine	0.7854	3.1047	2.8945
Orange douce	0.9114	3.6027	3.3588

II.2. Régime intermédiaire : $30 < Ar < 100\ 000$, $Re = 1.732 Ar^{0.714}$

L'évolution de la vitesse en fonction du diamètre des gouttelettes est exprimée à partir de la définition de Re , et est représentée sur la figure suivante pour différentes huiles essentielles [16]:

$$v = Re \cdot \mu / d \cdot \rho_1$$

II.2.1. Représentation graphique de la vitesse d'ascension en fonction du diamètre des gouttelettes :

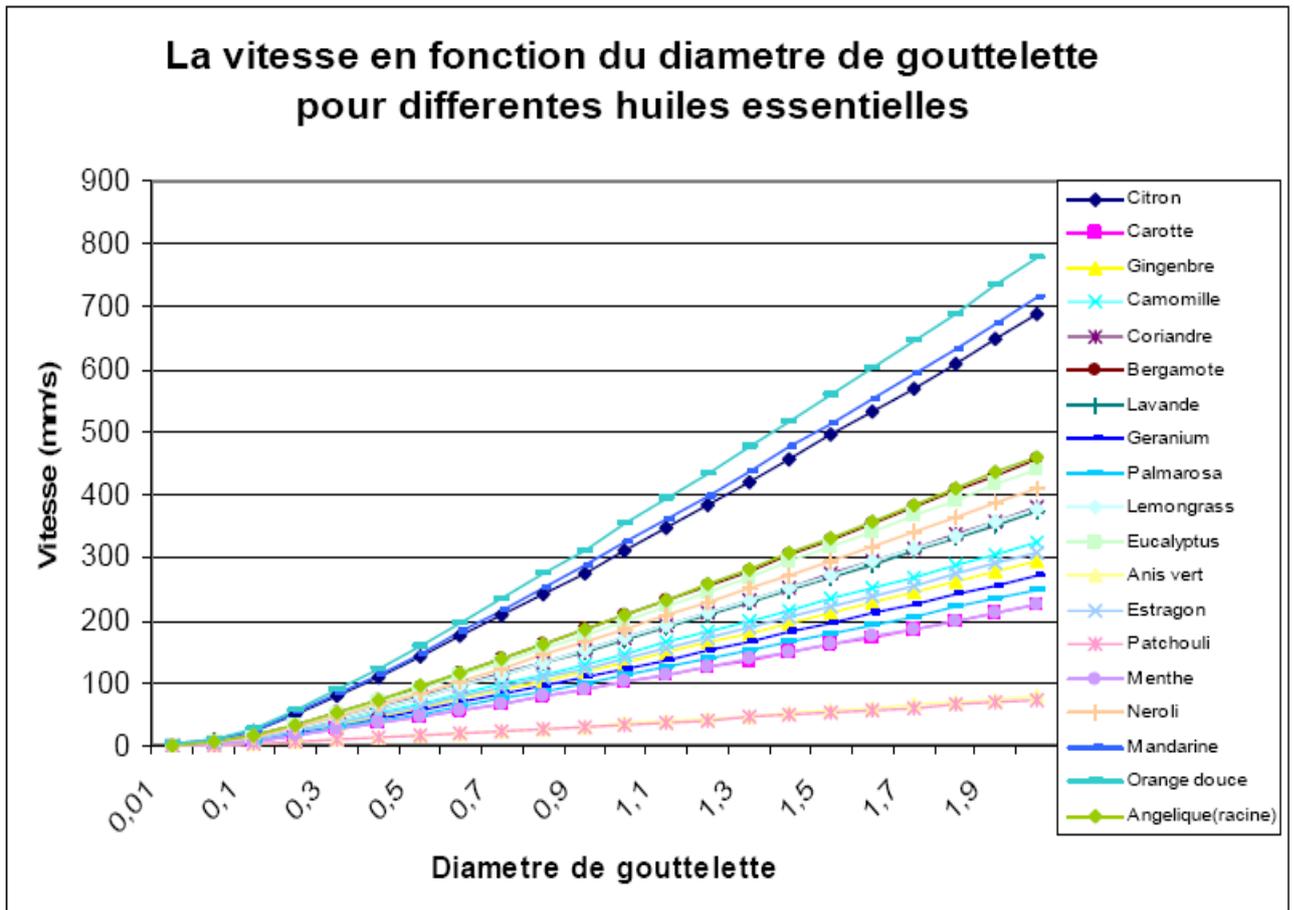


Figure 37 : Evolution de la vitesse d'ascension d'une gouttelette en fonction de son diamètre pour différentes huiles essentielles, en régime intermédiaire [16]

II.2.2. Interprétation de graphe :

Les courbes des différentes huiles essentielles ont la même allure générale, en effet elles sont d'allures croissantes, c'est à dire que la vitesse augmente avec le diamètre des gouttelettes. Comme pour le graphe précédent, la vitesse d'ascension dépend de la viscosité de l'huile essentielle, ainsi plus la viscosité est importante plus la vitesse est faible, et inversement, cependant, on constate qu'en régime intermédiaire la vitesse augmente plus rapidement avec le diamètre qu'en régime laminaire.

II.2.3. Corrélations pour les différentes huiles essentielles :

La corrélation générale est de la forme : $v = a.d^2 + b.d - c$; $R^2=0,999$.
Les coefficients de corrélation obtenus sont regroupés dans le tableau suivant [16]:

Tableau 45 : Coefficients de corrélation pour les différentes huiles essentielles, en régime intermédiaire [16]

Huiles essentielles	a	b	c
Patchouli	0.0449	2.600	4.773
Menthe	0.1376	7.972	14.636
Palma Rosa	0.1519	8.803	16.161
Gingembre	0.1803	10.449	19.184
Carotte	0.1376	7.972	14.636
Géranium	0.1661	9.628	17.676
Coriandre	0.2320	13.446	24.686
Néroli	0.2508	14.533	26.681
Lavande	0.2283	13.228	24.286
Anis vert	0.0478	2.768	5.082
Eucalyptus	0.2823	16.360	30.035
Lemon-grass	0.2311	13.394	24.591
Camomille	0.1984	11.499	21.111
Bergamote	0.2797	16.208	29.757
Estragon	0.1887	10.939	20.083
Angélique (racines)	0.2823	16.360	30.035
Citron	0.4202	24.355	44.714
Mandarine	0.4360	25.293	46.437
Orange douce	0.4756	27.565	50.607

II.3. Régime turbulent: $100\ 000 < Ar < 10^{11}$; $Re = 1,732Ar^{1/2}$; $\xi = 0,45$.

L'évolution de la vitesse en fonction du diamètre des gouttelettes est exprimée à partir de la loi de Newton et est représentée sur la figure suivante pour différentes huiles essentielles [16]:

$$v = \sqrt{3 \cdot d \cdot g \cdot (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2}$$

II.3.1. Représentation graphique de la vitesse d'ascension en fonction du diamètre des gouttelettes :

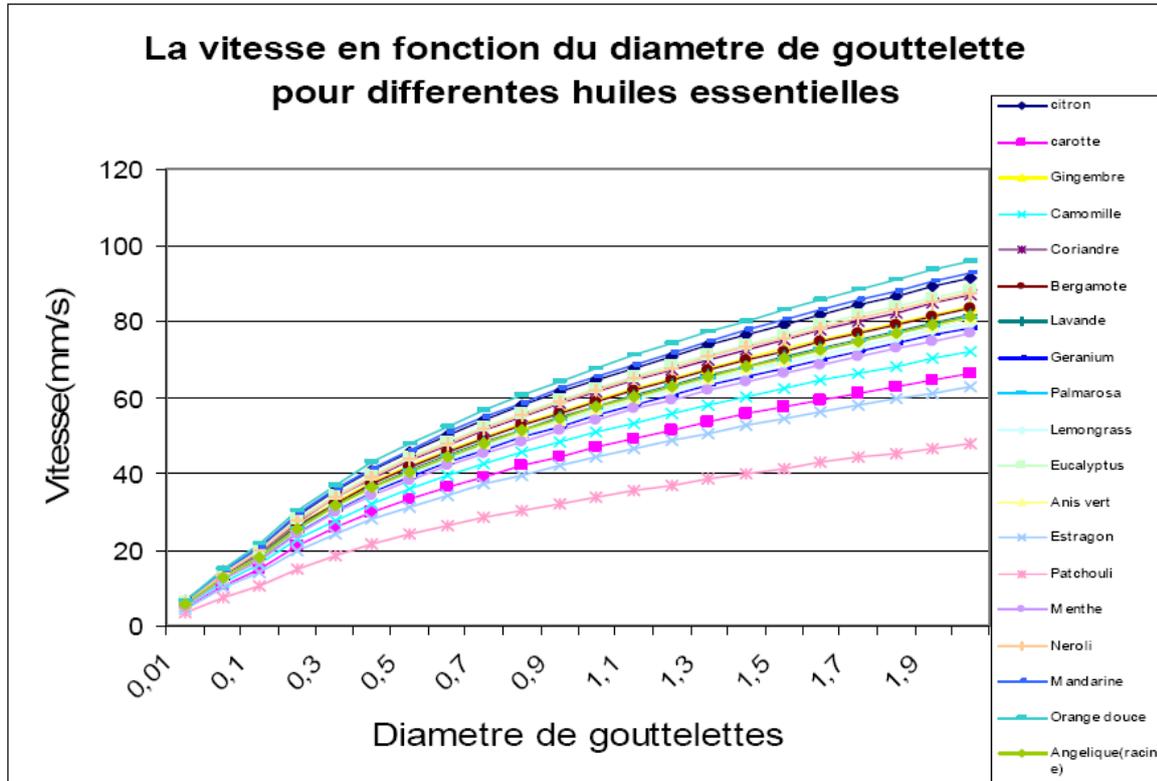


Figure 38 : Evolution de la vitesse d'ascension d'une gouttelette en fonction de son diamètre pour différentes huiles essentielles, en régime turbulent [16]

II.3.2. Interprétation du graphe :

Les courbes des différentes huiles essentielles ont la même allure générale, en effet elles sont d'allures croissantes, c'est-à-dire que la vitesse augmente avec le diamètre des gouttelettes. Comme pour le graphe précédant, la vitesse d'ascension dépend de la viscosité de l'huile essentielle, ainsi plus la viscosité est importante plus la vitesse est faible, et inversement, cependant, on constate qu'en régime turbulent la vitesse augmente plus rapidement avec le diamètre qu'en régime intermédiaire et laminaire.

II.3.3. Corrélations pour les différentes huiles essentielles :

La corrélation générale est de la forme : $v = a.d^3 - b.d^2 + c - e$; $R^2=0,9997$.
Les coefficients de corrélation obtenus sont regroupés dans le tableau suivant [16]:

Tableau 46 : Coefficients de corrélation pour les différentes huiles essentielles, en régime turbulent [16]

Huiles essentielles	a	b	c	e
Patchouli	0.0037	0.1941	4.7437	1.1798
Menthe	0.0059	0.3108	7.5961	1.8893
Palma Rosa	0.0062	0.3289	8.0389	1.9994
Gingembre	0.0064	0.3404	8.3211	2.0696
Carotte	0.0051	0.2691	6.5784	1.6361
Géranium	0.0060	0.3169	7.7465	1.9267
Coriandre	0.0066	0.3516	8.5940	2.1375
Néroli	0.0067	0.3544	8.6608	2.1541
Lavande	0.0062	0.3304	8.0747	2.0083
Anis vert	0.0062	0.3274	8.0030	1.9905
Eucalyptus	0.0068	0.3584	8.7602	2.1788
Lemon-grass	0.0061	0.3230	7.8941	1.9634
Camomille	0.0055	0.2915	7.1257	1.7723
Bergamote	0.0064	0.3376	8.2514	2.0523
Estragon	0.0048	0.2544	6.2176	1.5464
Angélique (racines)	0.0062	0.3289	8.0389	1.9994
Citron	0.0071	0.3755	9.1784	2.2828
Mandarine	0.0071	0.3755	9.1784	2.2828
Orange douce	0.0073	0.3882	9.4875	2.3597

II.4. Résumé :

La vitesse d'ascension d'une gouttelette dans un décanteur augmente avec la différence des masses volumiques de l'eau et de l'huile essentielle, de l'accélération de la pesanteur g , et du diamètre de la gouttelette.

La vitesse d'ascension diminue lorsque la viscosité du milieu augmente, ou le diamètre des particules diminue.

La vitesse d'ascension augmente plus rapidement avec le diamètre lorsque le régime est turbulent.

Les facteurs clefs de la décantation sont la différence de masse volumique entre les deux liquides, la taille des particules et la viscosité du fluide.

III. Représentation de la vitesse d'ascension en fonction de la densité, de la viscosité et du diamètre de la gouttelette d'huile essentielle :

Comme nous l'avons constaté, la vitesse d'ascension d'une gouttelette dans un décanteur dépend de la densité de l'huile essentielle, de sa viscosité, et du diamètre de la gouttelette. Nous avons donc utilisé des abaques représentant la vitesse d'ascension de la gouttelette, son diamètre et la viscosité de l'huile essentielle, tracés en utilisant le logiciel MATLAB 7.0. L'algorithme obtenu figure en Annexe 5 [16].

Pour cela, les domaines de variation choisis sont les suivants :

- Domaine de variation de Densité : $[0,80 ; 0,96] \text{ g / cm}^3$.
- Domaine de variation de la Viscosité à 20°C : $[1 ; 21] \text{ mPa.s}$.
- Domaine de variation du Diamètre des gouttelettes $[0,01 ; 2] \text{ mm}$.

Sur les 3 domaines, ne sont considérés que ceux du régime laminaire et du régime intermédiaire :

- $Ar < 30$ Régime laminaire.
- $30 < Ar < 100\ 000$ Régime intermédiaire.

III.1. Régime laminaire

L'abaque représenté dans la figure 39 représente la vitesse d'ascension de la gouttelette en fonction de son diamètre, de la viscosité ainsi que de la densité de l'huile essentielle pour le régime laminaire.

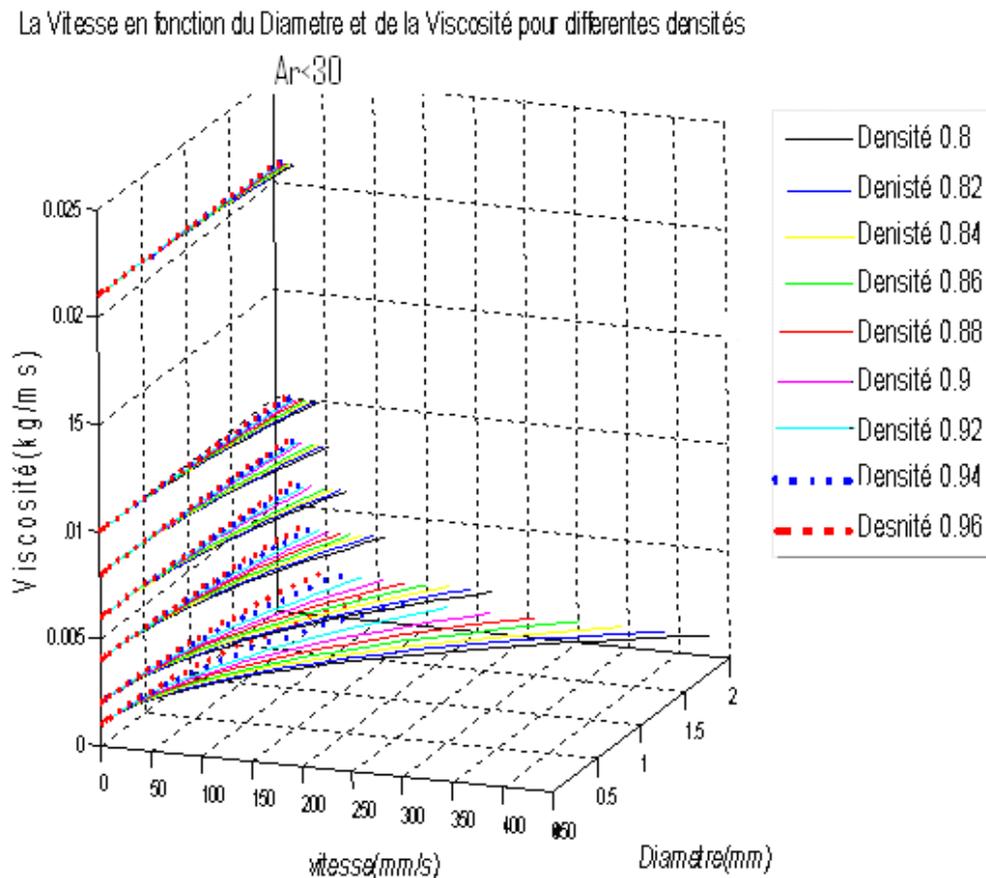


Figure 39 : Evolution de la vitesse en fonction du diamètre de gouttelettes, de la viscosité de l'huile essentielle pour différentes densités en régime laminaire [16]

III.2. Régime intermédiaire

L'abaque représenté dans la figure 40 représente la vitesse d'ascension de la gouttelette en fonction de son diamètre, de la viscosité ainsi que de la densité de l'huile essentielle pour le régime intermédiaire.

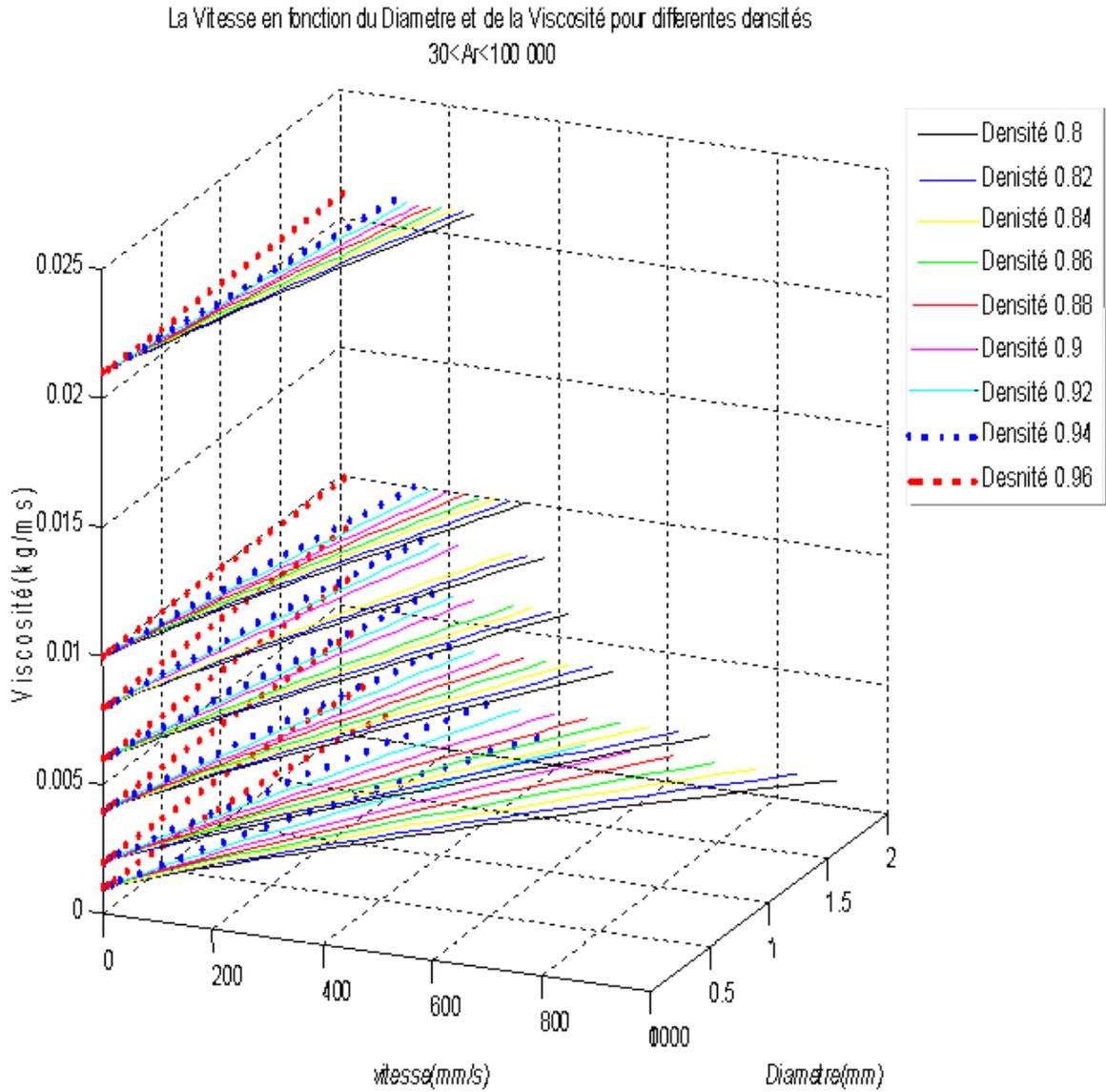


Figure 40 : Evolution de la vitesse en fonction du diamètre de gouttelettes, de la Viscosité de l'huile essentielle pour différentes densités en régime intermédiaire [16]

IV. Dimensionnement du décanteur :

Le but est de déterminer les équations permettant le calcul des dimensions du décanteur.

Les hypothèses sur lesquelles s'appuient nos calculs sont :

- Les gouttelettes entrant dans le vase sont uniformément réparties sur toute la section d'entrée du décanteur.
- Une gouttelette est considérée comme retenue lorsqu'elle atteint le fond du vase.
- Nous supposons qu'on est en régime laminaire, ce qui implique l'utilisation de la loi de Stokes.

Nous savons que le temps est fonction de la vitesse et de la distance parcourue par la gouttelette mais aussi du volume et du débit. On écrit : $t = H/v = V/Me$;

Donc : $V/H = Me/v$ [13]

Le rapport V/H est donc fonction du débit, et de la vitesse d'ascensions de la particule.

Notre débit est fixé à 100 L/h, c'est à dire $2,78 \times 10^{-5}$ m/s. La vitesse de la particule quant à elle dépend de la nature de l'huile (viscosité et densité), et du diamètre de la gouttelette, comme vu précédemment.

Le but de notre unité étant de produire une large variété d'huiles essentielles, nous nous placerons pour le dimensionnement du décanteur dans le cas le plus défavorable, qui est en l'occurrence celui du patchouli, qui est très visqueux et dense ($\rho=950$ kg/m³ ; $\mu=0,021$ kg/m.s).

Le diamètre de la gouttelette dépend de la vitesse d'ascension, et afin qu'il y ait décantation, $d > d_{\min}$ permettant l'ascension tel que : $d_{\min} = [18 \cdot \eta \cdot v / (\rho_2 - \rho_1) \cdot g]^{0,5}$

On supposera alors V et H pour obtenir le rapport Me/v , et en déduire d_{\min} . Toute gouttelette ayant un diamètre supérieur réalisera la décantation.

Nous supposons un décanteur de 0,02 m³ et 0,3 m de hauteur. Le rapport Me/v sera donc de 0,066 m², on obtiendra alors une vitesse $v = 4,17 \times 10^{-4}$ m/s, et un diamètre minimum :

$$d_{\min} = 0,00434 \text{ mm}$$

Pour qu'il y ait décantation : $v > v_p$ d'où $d > d_{\min}$

$$\text{Donc : } d > 0,00434 \text{ mm}$$

Vérifions qu'on se situe effectivement dans le domaine de Stokes: $Re = \rho \cdot v \cdot d / \mu = 0,0039$

C'est donc bien le régime laminaire. On est dans le domaine des très petits diamètres de gouttelettes, toutes les huiles devraient donc réaliser la décantation [13].

Puisque nous sommes dans le cas d'un petit décanteur, nous prendrons un vase florentin en inox, ayant les dimensions suivantes :

Tableau 47 : Dimensions du vase florentin pour chaque Mobilab

	Petit Mobilab	Moyen Mobilab	Grand Mobilab
Volume (m³)	0,01	0,02	0,04
Hauteur totale (m)	0,30	0,30	0,30
H₁ (m)	0,10	0,10	0,10
H₂ (m)	0,20	0,20	0,20
Diamètre d' (m)	0,23	0,32	0,45
Diamètre D' (m)	0,37	0,53	0,75

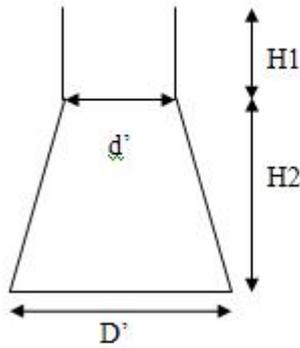


Figure a: Dimensions du vase florentin



Figure b: Vase florentin [33]

Figure 41 : Schéma du vase florentin

Nous placerons un vase florentin supplémentaire dans le Mobilab afin de remplacer le premier en cas de problème. Ils seront munis d'un petit robinet de vidange en bas, afin de pouvoir extraire l'eau et continuer l'extraction en cas de problème (panne des pompes, problème d'installation électrique, etc.). L'huile essentielle extraite sera récupérée dans des récipients de 6 L, reversés dans des flacons fermés qui seront stockés dans une armoire.

F. Pompe

À la sortie du décanteur, la phase aqueuse est réinjectée dans la chaudière, c'est ce que l'on appelle le cohobage. Cela permet d'avoir un meilleur rendement d'extraction, le rendement en huile essentielle étant faible et le prix de revient élevé, et d'économiser de l'eau, puisqu'on fonctionnera en circuit fermé. De plus, cela nous permettra d'abaisser la teneur de l'eau en huiles essentielles, qui peuvent être toxiques.

Nous utiliserons pour cela une pompe, que nous dimensionnerons à l'aide du logiciel Hysys. Notre but est de trouver une pompe qui puisse refouler l'eau sur 7m de conduite horizontale, et jusqu'à 1m de hauteur, pour la réinjecter dans le ballon de la cheminée. De plus, la pompe ne doit pas consommer trop d'électricité. Afin de la dimensionner, nous utiliserons le logiciel Hysys.

I. Simulation Hysys de la pompe :

Dans la partie qui suit, nous simulerons le fonctionnement d'une pompe. Tout comme pour l'aérocondenseur, on choisira le système international, le Chao Seader comme modèle thermodynamique, et l'eau comme composé.

Composition du courant d'entrée :

Le courant d'entrée est composé d'eau à l'état liquide, à une température de 25°C. La pression d'entrée est de 100 KPa, et le débit de 100L/h.

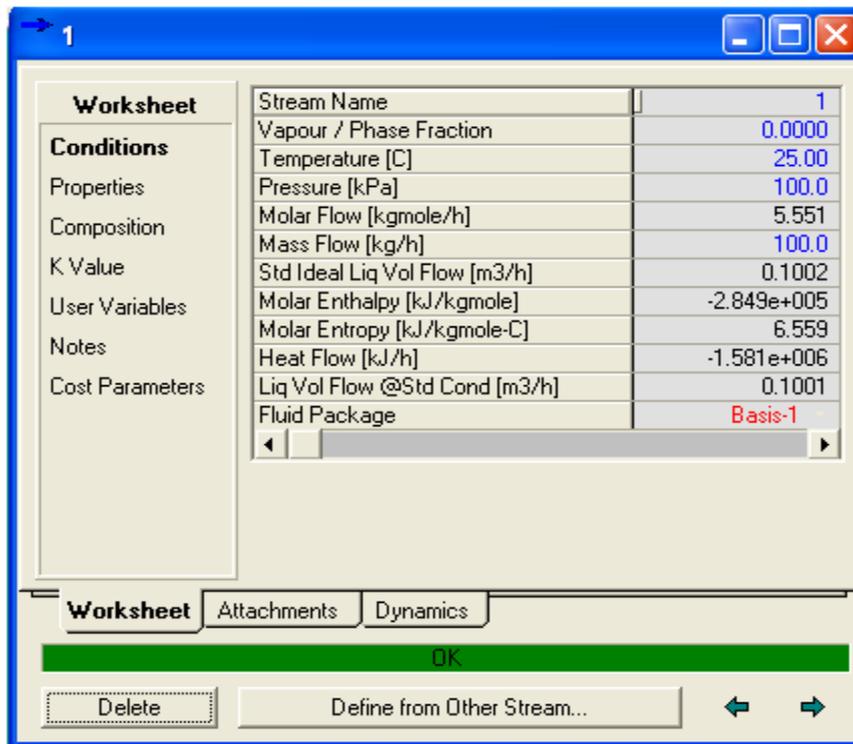


Figure 42: Tableau de composition du courant d'entrée de la pompe sur Hysys

Choix de l'énergie de la pompe :

Nous choisissons une pompe qui consomme 50W, comme il apparaît sur la figure suivante :

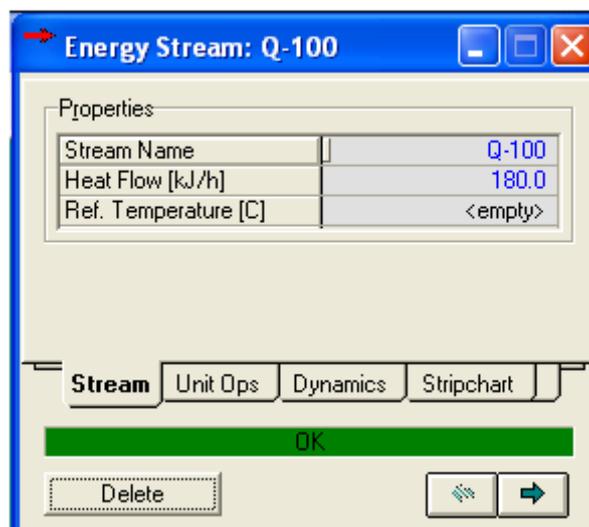


Figure 43 : Choix de l'énergie de la pompe sur Hysys

Choix des spécifications dynamiques :

La pompe doit refouler de l'eau jusqu'à 1m de hauteur. On lui impose donc cette hauteur, et une efficacité de 90%. Les paramètres en bleu sont les paramètres imposés, et ceux en noir les paramètres calculés.

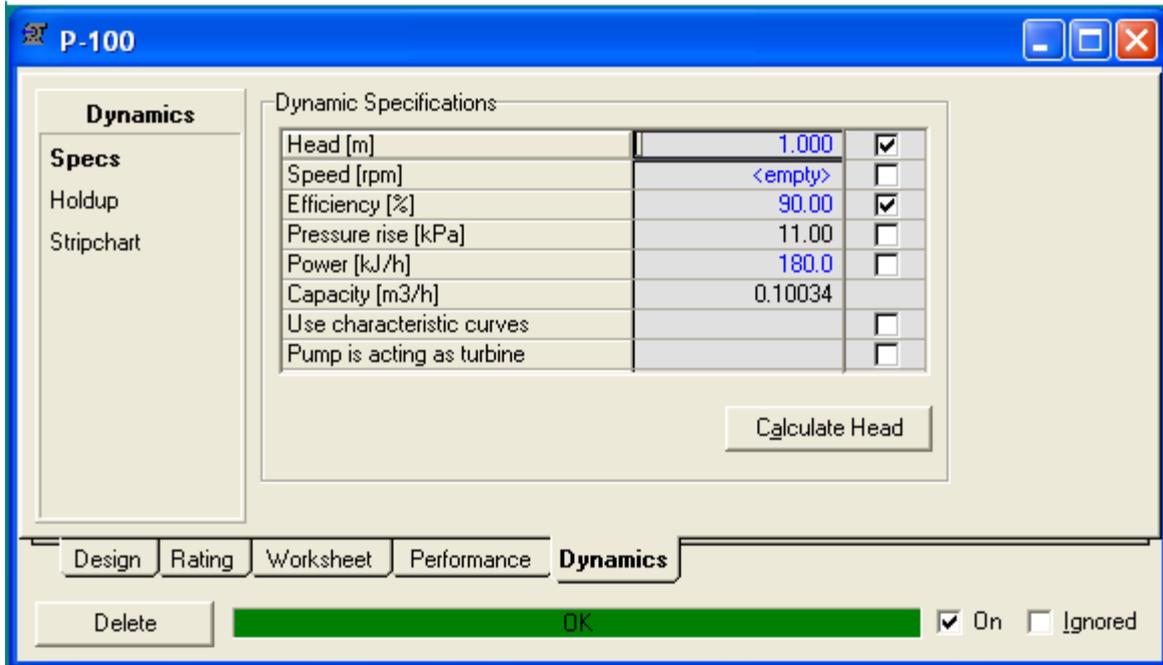


Figure 43: Spécifications dynamiques de la pompe sur Hysys

Résultat Hysys pour le dimensionnement de la pompe :

Par le biais du Hysys, nous obtenons les pressions de sortie de la pompe, la NPSH, et les pertes de charges

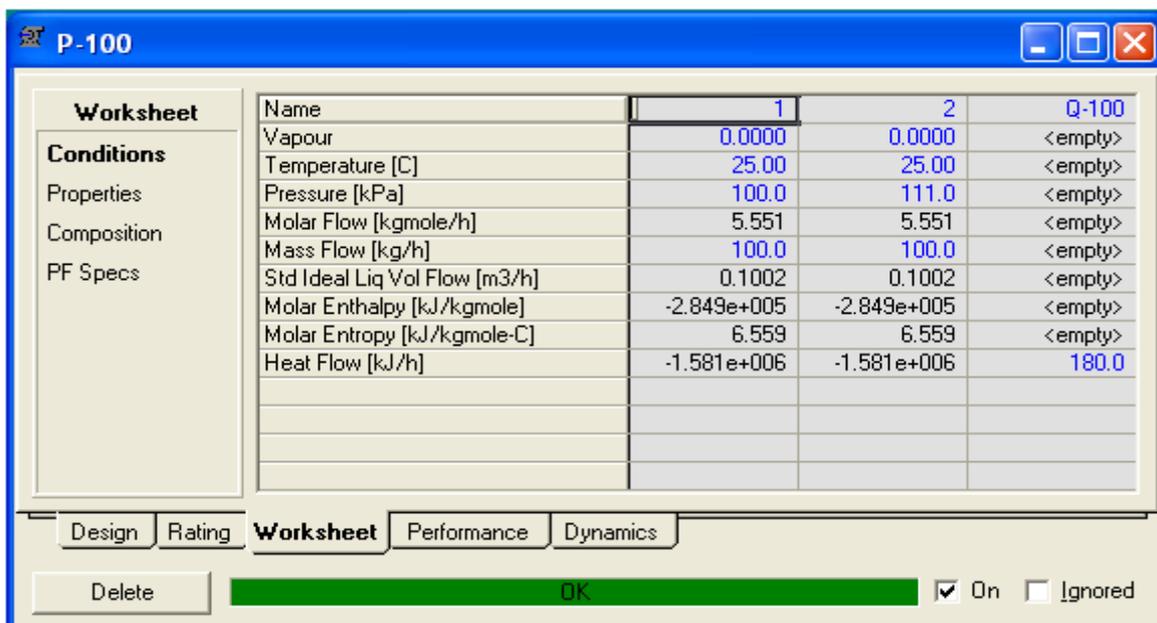


Figure 44 : Fiche technique de la pompe sur Hysys

On pourra donc, à partir de ces caractéristiques choisir une pompe sur le marché. Nous avons choisit une pompe doseuse répondant à toutes nos caractéristiques, et ayant les dimensions suivantes :

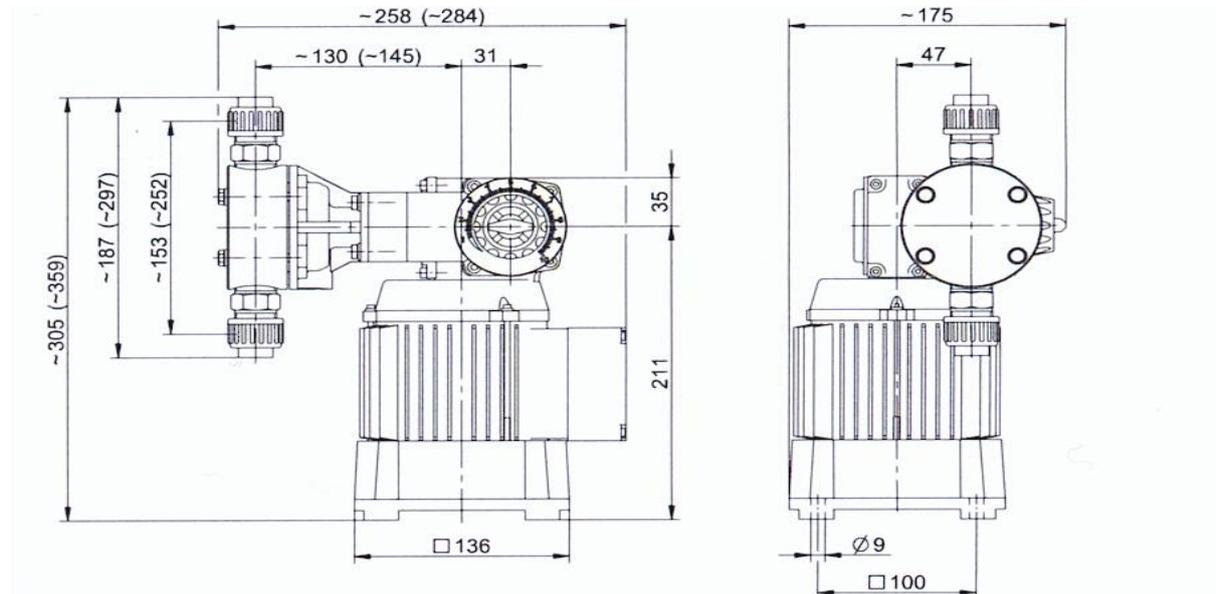


Figure 45 : Dimensions de la pompe [55]

Pour plus de sécurité, nous placerons une deuxième pompe semblable à la première en parallèle, afin de la remplacer en cas de panne.

G. Dimensionnement Photovoltaïque

Pour le dimensionnement photovoltaïque, nous utiliserons le logiciel tecsol pour le photovoltaïque isolé. Ce logiciel permet d'évaluer la taille et le prix d'un générateur photovoltaïque complet, groupe électrogène inclus, à partir de la définition précise de nos besoins électriques.

I. Dimensionnement photovoltaïque pour l'aérocondenseur :

Pour faire fonctionner les ventilateurs de l'aérocondenseur, nous aurons besoin d'électricité. Chaque ventilateur consomme 60W et travail pendant 8heures. Nous aurons donc besoin de $N \times 480W$, N étant le nombre de ventilateurs utilisés. Notre unité se voulant énergétiquement autonome et propre, nous produirons notre propre électricité par le biais de panneaux solaires photovoltaïques, dimensionnés à l'aide du logiciel Tecsol.

I.1. Choix du type d'appareil :

Tout d'abord on doit choisir le type d'appareil pour lequel on doit produire de l'électricité. Le logiciel en déduira la quantité d'électricité qu'il est nécessaire de produire. Dans notre cas, on choisira le nombre de ventilateur, leur consommation et le nombre d'heures de travail par jour [42].

Tableau 48 : Quantité d'électricité nécessaire au fonctionnement des ventilateurs pour chaque Mobilab

	Petit Mobilab	Moyen Mobilab	Grand Mobilab
Nombre de ventilateur	4	8	16
Consommation de chaque ventilateur (W)	60	60	60
Nombre d'heures de travail par jour	8	8	8
Quantité d'électricité nécessaire par jour (Wh/jr)	1920	3840	7680

I.2. Sélection de la zone d'utilisation :

Le logiciel n'inclus pas l'Algérie dans la liste des pays disponibles, nous choisissons donc une région proche d'Alger et de sa latitude, et ayant un potentiel solaire semblable. La région sélectionnée est donc celle d'Alicante en Espagne.

I.3. Contraintes d'utilisation :

Autonomie souhaitée	<input type="text" value="5"/> (Nbre de jours)
Orientation des panneaux	<input type="text" value="0"/> (°/Sud)
Puissance unitaire des modules	<input type="text" value="50"/> (Wc)
Refuge de montagne	<input type="checkbox"/>
Sécurité de fonctionnement	<input type="radio"/> Faible <input checked="" type="radio"/> Normale <input type="radio"/> Renforcée
Emplacement des panneaux	<input checked="" type="radio"/> Toiture <input type="radio"/> Pignon <input type="radio"/> Sol

Hauteur angulaire moyenne des obstacles	
<input type="radio"/> Pas de masques	<input type="radio"/> 21 - 25 °
<input type="radio"/> 0 - 10 °	<input type="radio"/> 26 - 30 °
<input type="radio"/> 11 - 20 °	<input type="radio"/> 31 - 35 °

Figure 46 : Sélection des contraintes d'utilisation sur Tecsol [42]

I.4. Résultats :

I.4.1. Exemple détaillé pour un Mobilab moyen :

Tableau 49 : Situation du projet [42]

Date	6/5/2009
Nom du PROJET	Mobilab
Station Météo	Alicante
Latitude du lieu	38°22
Mois le plus défavorable	Janvier
Besoins moyens (Wh/j)	3840
% fourniture groupe (mois défavorable)	10

Type de besoins	Equipement	Nombre	Consommation (Wh/j)
Electroménager	Ventilateur	8	3840

Tableau 50 : Production électrique mensuelle[42]

Mois	Insolation modules (Wh/j.m2)	Potentiel électrique (Wh/j)
Janvier	3573	2786
Février	4857	3788
Mars	5153	4019
Avril	6124	4776
Mai	6757	5270
Juin	7129	5560
Juillet	7243	5649
Août	6476	5051
Septembre	5704	4449
Octobre	4439	3462
Novembre	3311	2582
Décembre	2793	2178

Tableau 51 : Dimensionnement Tecsol du champ photovoltaïque [42]

Dimensionnement champ photovoltaïque	
Puissance Crête (Wc)	1300
Puissance 1 module (Wc)	50
Tension unitaire module (V)	12
Nombre total de modules	26
Orientation (°)/Sud	0
Inclinaison la plus favorable (°)	15
Nbre modules en série	2
Nbre de branches en parallèle	13
Surface approximative des modules (m2)	13
Intensité maximum de charge (A)	37,92

Bien que l'inclinaison donnée par Tecsol soit de 15°, elle est généralement différente en Algérie. En effet, en hiver, les rayons sont très inclinés (le soleil est "bas"). L'inclinaison devra être voisine de 45° (la latitude du lieu + 10°). En été, les panneaux sont perpendiculaires aux rayons du soleil. La pente des capteurs sera donc voisine de 25° (latitude - 10°) [56].

Tableau 52 : Dimensionnement Tecsol de la batterie [42]

Dimensionnement Batteries	
Nbre jours d'autonomie	5
Profondeur de décharge maxi (%)	70
Tension batterie (V)	24
Tension de distribution (V)	230
Capacité batterie (AhC100)	1400
Durée de recharge (h)	36
Taux de cyclage nominal journalier (%)	11,43

Tableau53 : Dimensionnement Tecsol de l'onduleur [42]

Dimensionnement Onduleur	
Tension entrée onduleur (V)	24
Puissance installée (W)	480
Puissance maxi au démarrage (W)	720
Puissance onduleur conseillée (VA)	500

Tableau 54 : Dimensionnement Tecsol de l'appoint de secours [42]

Appoint secours	
Capacité chargeur (A)	70
Puissance chargeur (W)	2700
Puissance mini du groupe (VA)	3840

Tableau 55 : Estimation Tecsol du coût de l'installation [42]

Investissement Hors Taxes		
Taux ingénierie (%)	10,2	
Surcoût transport	0 (k€)	0 (Da)
Total investissement	31,25 (k€)	3,125 (M Da)
Ingénierie	3,04 (k€)	0,304(M Da)
Total projet	34,3 (k€)	3,43(M Da)

I.4.2. Résultats pour les 3 Mobilab :

Tableau 56 : Récapitulatif du dimensionnement photovoltaïque Tecsol pour l'aérocondenseur pour les trois Mobilab [42]

	Petit Mobilab	Moyen Mobilab	Grand Mobilab
Besoins en électricité (WH)	1920	3840	7680
Nombre total de modules	14	26	52
Surface approximative des modules (m ²)	7	13	26
Intensité maximum de charge (A)	20,42	37,92	37,92 (A)
Dimensionnement Batteries			
Capacité batterie (AhC100)	700	1400	1400
Durée de recharge(h)	34	36	36
Dimensionnement Onduleur			
Puissance installée(W)	240	480	960
Puissance maxi au démarrage (W)	360	720	1440
Puissance onduleur conseillée (VA)	300	500	900
Appoint secours			
Capacité chargeur (A)	35	70	70
Puissance chargeur (W)	1400	2700	5300
Puissance mini du groupe (VA)	2040	3840	7440
Investissement Hors Taxes			

Total investissement	16,7 (k€)	31,25 (k€)	58,5(k€)
Ingénierie	1,9 (k€)	3,04 (k€)	4,5(k€)
Total projet	18,7 (k€)	34,3 (k€)	63,1(k€)

II. Dimensionnement photovoltaïque total :

En dehors des ventilateurs de l'aérocondenseur, nous utiliserons un ventilateur de plafond de 40W, afin d'aérer le Mobilab coté cheminée, et une pompe de 50W pour le cohobage. Nous aurons donc besoin d'électricité supplémentaire, et donc de panneaux solaires supplémentaires. Le tableau suivant est un tableau récapitulatif du dimensionnement photovoltaïque total pour les trois Mobilab :

Tableau 57 : Quantité d'électricité nécessaire pour chaque Mobilab

	Petit Mobilab	Moyen Mobilab	Grand Mobilab
Capacité du ventilateur de plafond	40	40	40
Quantité d'électricité nécessaire par jour pour le ventilateur de plafond (Wh/jr)	320	320	320
Quantité d'électricité nécessaire par jour pour l'aérocondenseur (Wh/jr)	1920	3840	7680
Quantité d'électricité nécessaire par jour pour la pompe (Wh/jr)	400	400	600
Quantité d'électricité nécessaire par jour (Wh/jr)	2640	4560	8600

Tableau 58 : Récapitulatif du dimensionnement photovoltaïque pour les trois Mobilab
[42]

	Petit Mobilab	Moyen Mobilab	Grand Mobilab
Production électrique (WH)	2840	4760	8600
Nombre total de modules	18	30	56
Surface approximative des modules (m ²)	9	15	28
Intensité maximum de charge (A)	26,25	43,75	40,83
Dimensionnement Batteries			
Capacité batterie (AhC100)	1000	1700	1600
Durée de recharge (h)	38	38	39
Dimensions/poids L×l×H (mm) / kg	235×220×688 / 80	392×211×630 / 95	400×223×815/ 160
Dimensionnement Onduleur			
Puissance installée(W)	355	595	1075
Puissance maxi au démarrage (W)	645	1005	1725
Puissance onduleur conseillée (VA)	400	600	1100
Dimensions/poids L×l×H (mm) / kg	150×160×86 / 2,1	120 x 350 x 195/ 11,3	143×408×205 / 18
Appoint secours			
Capacité chargeur (A)	50	85	80
Puissance chargeur (W)	1900	3300	6100
Puissance mini du groupe (VA)	2760	4680	8640
Dimensions/poids L×l×H (mm) / kg	188x128x49 / 0,5	340x190x75 / 4,2	385x190x100 / 5
Investissement Hors Taxes			
Total investissement	22,41 (k€)	36,89 (k€)	65,09(k€)
Ingénierie	2,43 (k€)	3,2 (k€)	5,18(k€)
Total projet	24,84 (k€)	40,09 (k€)	70,27(k€)

A partir de ce tableau, nous pouvons conclure que placer une installation photovoltaïque pour notre Mobilab est tout à fait possible. L'espace que nous offre le toit suffit largement à la production de l'énergie nécessaire au bon fonctionnement de notre unité.

Les panneaux solaires photovoltaïques que nous choisirons auront une puissance de 50Wc, et une surface de 0,5m². Nous accompagnerons l'installation photovoltaïque d'un kit d'intégration toiture en charpente métallique, qui est constitué de cadres et rails de fixation, ainsi que de pieds coulissants, afin de pouvoir régler la position des panneaux à notre guise. A l'intérieur du Mobilab, nous aurons une batterie, un onduleur et un chargeur.

III. Comment choisir la bonne batterie ?

Il existe deux principaux types d'accumulateurs de grande capacité : les batteries dites « ouvertes », qui sont des batteries au plomb contenant de l'électrolyte liquide dont l'eau doit être renouvelée, et les batteries dites étanches, qui ne contiennent pas de liquide mais du gel, et peuvent ainsi fonctionner dans toutes les positions et ne demandent absolument aucun entretien puisqu'il n'y a pas d'eau à rajouter.

Pour garantir l'efficacité de notre installation et ne pas avoir de surprise de coupure de courant, il est primordial d'estimer au mieux la capacité minimale que notre batterie doit avoir. La capacité d'une batterie se calcule en **Ampères-heures (Ah)**, c'est à dire en nombre d'ampères à « tirer » pendant X heures pour décharger la batterie. Cette capacité dépend entre autre de la façon dont la batterie est chargée et déchargée. Les caractéristiques des batteries sont souvent données pour des décharges de 20, 100 ou 120 heures (C20, C100 ou C120) et pour une température de 25°C. La capacité de notre batterie est donnée en C100.

La charge de la batterie va s'effectuer grâce au panneau solaire photovoltaïque. Au fur et à mesure de la journée, la tension de la batterie va augmenter jusqu'à un seuil d'environ 14V (pour une batterie de 12V). Au-delà de cette limite, le régulateur solaire va couper la liaison électrique avec le panneau afin d'éviter les problèmes de surtensions. A l'inverse, ce même régulateur coupe automatiquement l'alimentation électrique avec le récepteur lorsque la tension de la batterie est trop faible (environ 11V pour une batterie de 12V).

Un autre paramètre à prendre en compte lors du choix de la batterie est l'autonomie souhaitée de l'installation. L'autonomie est la période durant laquelle la batterie est capable de fournir de l'énergie sans avoir besoin d'être rechargée. Autrement dit, c'est le nombre de jours pendant lesquels l'installation peut fonctionner sans lumière [57].

Finalement, la formule pour déterminer la capacité de notre batterie est :

$$\text{(Consommation en Wh / Tension en Volts) x Autonomie en Jours x 1,25 [57]}$$

Chapitre IV: Etude technico-économique

Nomenclature Chapitre IV

Nom	Description	Unité
PEHD	Polyéthylène haute densité	[-]
DRI	Délai de retour sur investissement	[mois]
VPM	Valeur des paiements	[-]
A	La dotation pour provisions aux amortissements	[DA]
I	Les investissements	[DA]
N	Durée d'amortissement du photovoltaïque par économie d'énergie	[année]
V	Recettes annuelles	[DA/an]
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 ₁	Investissement de l'unité	[DA]
I ₂	Investissement de l'installation photovoltaïque	[DA]
I ₃	Investissement du matériel roulant	[DA]
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]
n	Durée de l'amortissement	[année]

A. Définition des éléments du calcul économique

Evaluer la rentabilité économique d'un projet consiste à établir le bilan recette - dépenses de l'installation de production. Les recettes proviennent de la vente des produits fabriqués et sont obtenues à partir des prévisions issues de l'étude du marché, qui a établi le volume probable des transactions et leur niveau de prix estimé.

I. Les investissements :

Le montant des investissements correspond à la somme totale qu'une société doit dépenser pour réaliser un projet industriel afin d'effectuer les diverses opérations qui s'y rapportent, depuis les études technico-économiques préliminaires jusqu'à la mise en marche effective des installations [7].

II. Les charges fixes :

Ce sont des dépenses annuelles dont le calcul s'effectue à partir des investissements de l'unité. Elles sont appelées fixes, parce que constantes pour une capacité de traitement donnée, quelle que soit la quantité effectivement produite.

Ces frais pourront être différents d'une société à l'autre, parfois même d'une usine à l'autre au sein d'une même société, selon la politique qu'elle pratique. Elles comprennent, par exemple, les loyers, les primes d'assurance, les provisions pour amortissements, les frais financiers [7].

III. Les charges variables :

Ces charges sont appelées variables, parce que, à l'inverse des charges fixes, elles sont proportionnelles à la production réelle de l'unité et non à sa capacité nominale. Elles sont aussi appelées charges d'activité, et comprennent [7] :

- La matière première, les produits et réactifs utilisés.
- Les utilités (électricité, combustible, vapeur, eau de refroidissement, eau de vapeur, condensats),
- Les frais divers.

IV. Le temps de remboursement :

On l'appelle aussi temps de récupération du capital, défini comme étant la durée au bout de laquelle les recettes totales liées au fonctionnement d'une unité ou d'un complexe, déduction faite de toutes les sorties y compris les taxes, sont égales au montant global des investissements [7].

B. Détermination des investissements :

Les investissements de notre unité représentent le coût total de l'installation, et comportent le prix du Mobilab, de chacun de ses différents équipements, et de l'installation photovoltaïque. De plus, le coût du montage et des différents instruments utilisés sont pris en compte dans le coût total. Les investissements calculés sont des investissements hors taxes.

I. Détermination du 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.

I.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 basés 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 59 : Prix d'achat du Mobilab

	Intervalle de prix (DA)	Prix choisit (DA)
Camion	1 000 000 - 4 000 000	4 000 000
Remorque (30 pieds)	100 000 - 3 000 000	3 000 000
Container (30 pieds)	90 000-120 000	100 000
Mobilab	1 200 000 -7 200 000	7 100 000

Nous nous fixons donc comme prix d'achat du Mobilab : **7 100 000 DA**

I.2. Prix de pose du Mobilab :

Le prix de pose du Mobilab regroupe le prix de tous les travaux qui doivent y être fait. Il comprend donc le prix des portes, des fenêtres, des ventilateurs de plafonds, des extincteurs, des échelles, de la citerne, des escabeaux, de l'armoire, ainsi que le prix de la main d'œuvre, que l'on estime à 20 % du prix d'achat du container.

Notre Mobilab comprend : 2 portes, 3 fenêtres, 3 extincteurs, 2 ventilateurs de plafond, 2 échelles, 3 escabeaux, une armoire, et une citerne de 300l.

Tableau 60 : Prix de pose du Mobilab

	Prix (DA)
Portes	21 000
fenêtres	19 500
extincteurs	7 500
ventilateurs de plafond	8 000
Echelles	10 000
Escabeaux	7 000
Armoire	4 000
Citerne	3 000
Main d'œuvre	20 000
Total	93 000

I.3. Prix du Mobilab :

Ayant pris en compte le prix d'achat, de la main d'œuvre et des différents appareils nécessaires au bon fonctionnement du Mobilab, on estime son cout à 7 200 000 DA

Prix du Mobilab = 7 200 000 DA

II. Détermination du prix de la cheminée :

La cheminée est constituée de briques réfractaires et d'un conduit de fumées en inox, le tout soutenu par une ossature en charpente métallique. On inclue dans la cheminée le ballon d'eau chaude qu'elle contient, le silo qui la relie à l'extérieur, et le conduit d'aération.

Le prix de la cheminée sera donc celui de toutes ses composantes, ainsi que celui de la main d'œuvre pour la construction de la cheminée, et qui est estimée à 20% de son prix.

Prix des briques = prix d'une brique réfractaire (5×5×20) cm × nombre de briques

Prix des briques = 70 (DA) × 507 = 35490 DA

Prix de la charpente = Prix cornière U inox/ML × longueur (m)

Prix de la charpente = 335 (DA) × 20 = 6700 DA

Prix du conduit de fumées = (Prix plaque inox/Kg × Poids (Kg)) + (0,1 × Prix plaque inox/Kg × Poids (Kg)) = (400 × 16) + (0,1×400×16)= 7040 DA

Prix du silo = (Prix plaque inox/Kg × Poids (Kg)) + (0,1 × Prix plaque inox/Kg × Poids (Kg)) = (400 × 14,4) + (0,1×400×14,4) = 6237 DA

Prix conduite d'aération = (Prix plaque inox/Kg × Poids (Kg)) + (0,1 × Prix plaque inox/Kg × Poids (Kg)) = (400 × 3,14) + (0,1 × 400 × 3,14) = 1382 DA

Tableau 61 : Prix de la cheminée

	Prix (DA)
Charpente métallique	6 700
Briques	35 490
Conduit de fumées	7 040
Conduite d'aération	1 382
Ballon d'eau chaude	1 050
Silo	6 237
Main d'œuvre	20 000
Total	78 371

Le cout de la cheminée est donc estimé à : 79 000DA

Prix de la cheminée = 79 000DA

III. Détermination du prix des caissons mobiles :

Les caissons mobiles sont des parallélépipèdes constitués de plaques en acier inoxydable, munis de roues, et d'un panier, d'un robinet de vidange, et relié 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 le Mobilab moyen, nous aurons 6 caissons mobiles.

Prix caisson mobile= (Prix inox/Kg × poids) + (0,2 × Prix inox/Kg × poids) + prix robinet de vidange = (400 × 22) + (0,2 × 400 × 22) + 500 = 11 000 DA.

Tableau 62 : Prix de l'installation caissons mobiles

	Prix (DA)
Caissons mobiles	66 000
Conduites PEHD	900
Total	66 900

Le cout des six caissons mobiles munis des conduites en PEHD est donc estimé à 70 000DA.

Prix extracteur = 70 000DA

IV. Détermination du prix de l'aérocondenseur :

Le condenseur est un serpentin en inox de 28,26 m de long, et 30mm de diamètre interne, accompagné de huit ventilateurs pour accélérer le processus de refroidissement. Le prix comprendra donc celui du serpentin, celui des huit ventilateurs, et celui de la main d'œuvre qui est estimé à 10% du prix du condenseur.

Prix serpentin = (Prix tubes inox (30/32) / m × longueur) + (0,1 × Prix tubes inox (30/32) / m × longueur) = (116 × 28,26) + (0,1 × 116 × 28,26) = 3628 DA.

Chaque ventilateur consomme 60W et a un diamètre de 0,5m. Le prix de ventilateurs semblables sur le marché est estimé à 7500DA. Il y a 8 ventilateurs dans notre Mobilab.

Tableau 63 : Prix de l'aérocondenseur

	Prix (DA)
Serpentin	3 628,0
Ventilateurs	60 000,0
Main d'œuvre	6 362,8
Total	69 990,8

Le prix de l'aérocondenseur est donc estimé à : 70 000DA

Prix de l'aérocondenseur = 70 000DA

V. Détermination du prix des décanteurs :

Le prix du décanteur est celui d'un essencier en inox de 20L que l'on trouve sur le marché. Nous en avons deux dans notre Mobilab. Il comprendra aussi le prix du robinet de vidange, de l'entonnoir, des récipients pour huiles essentielles, les deux pompes, ainsi que le prix des flacons d'huiles.

Tableau 64 : Prix du décanteur

	Prix (DA)
Essenciers	28 560
Récipient huiles + Entonnoir	1 500
Robinet de vidange	500
Pompes	15 000
Flacons d'huiles	3 000
Total	48 560

Le prix du décanteur est donc estimé à 48 560 DA.

Prix du décanteur= 48 560DA

VI. 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 65 : Prix de l'installation photovoltaïque

	Prix (DA)
Total investissement	3 689 000
Ingénierie	320 000
Total projet	4 009 000

Prix de l'installation photovoltaïque = 4 009 000DA

VII. Détermination du prix de l'instrumentation et de la tuyauterie :

Le prix des tuyaux en inox de 30mm de diamètre, et de 11,7m de long, se calcul comme suit :

$$\text{Prix tuyauterie} = (\text{Prix tubes inox (30/32)} / \text{m} \times \text{longueur}) = (116(\text{DA}) \times 11,7) = 1400\text{DA}$$

Le prix de l'instrumentation comprend celui :

- De la soupape de sécurité du ballon ;
- De l'indicateur de niveau du ballon ;
- Des cinq vannes et cinq débitmètres ;
- Du capteur de pression.

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

Tableau 66 : Prix de l'instrumentation

	Nombre	Prix (DA)	
Instrumentation	Vannes	5	60 000
	Débitmètres	5	150 000
	Capteur	1	12 000
	Soupape	1	2 500
	Indicateur de niveau	1	3 000
	Total	13	227 500

Tableau 67 : Prix de la tuyauterie et de l'instrumentation

	Prix (DA)
Tuyauterie	1 400
Instrumentation	225 700
Main d'œuvre	22 890
Total	251 790

Le prix de l'instrumentation et de la plomberie est donc estimé à : **251 790DA**

VIII. Détermination du Cout total de l'unité :

Tableau 68 : Cout total de l'unité

	Cout (DA)
Mobilab	7 200 000
Cheminée	79 000
Caissons mobiles	70 000
Aérocondenseur	70 000
Pompes et décanteur	48 560
Installation photovoltaïque	4 009 000
Instrumentation et tuyauterie	251 790
Total	11 728 350

Les investissements hors taxes du Mobilab nous reviendront donc à environ **11 730 000 DA**.

C. Comparaison avec une unité classique

Comme nous l'avons déjà vu, une unité classique d'huiles essentielles comporte principalement une chaudière au fioul ou électrique, un alambic, un condenseur à eau, et un décanteur. Elle nécessite aussi l'acquisition d'un terrain et d'un bâtiment. De plus, elle consommera beaucoup d'eau et d'énergie et doit payer le transport et le stockage.

Pour les besoins de cette étude, nous supposons que l'unité travaille 8 heures par jour, et huit mois par an.

I. Comparaison des investissements :

Une unité classique ayant la même capacité de production que la notre devra payer, en plus des équipements, un terrain, un bâtiment, ainsi que le transport de la matière première.

Le prix des équipements est basé sur l'étude menée dans la partie généralités.

Tableau 69 : Cout d'une unité classique d'extraction d'huiles essentielles

Rubrique	Prix (DA)
Terrain	14 664 831
Bâtiment	32 588 513
Chaudière	250 000
Alambic	200 000
Condenseur	400 000
Décanteur	50 000
Instrumentation	514 261
Main d'œuvre	141 426
Transport et Stockage	200 000
Total	49 009 031

Une unité classique d'extraction d'huiles essentielles, ayant la même capacité de production que la notre, coûtera donc 4 fois plus cher que notre unité mobile.

II. Economies d'eau réalisées :

Etant 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, grâce au cohobage, nous pouvons en utiliser beaucoup moins dans la journée, mais, 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 (débit de 100 L/h), soit 9000L/mois, et 72 000 L/an pour huit mois de travail.

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 1550L/h, soit 372 000 L/mois, et 2 976 000 L/an [16].

Tableau 70 : Economies d'eau réalisées par an

	Unité classique	Mobilab
Eau pour condenseur (m ³ /an)	2 976	0
Eau pour extraction (m ³ /an)	192	72
Total (m ³ /an)	3 168	72

Nous réalisons donc une économie d'eau de 3 096 000 L d'eau par an, pour un travail de huit mois, et un débit de 100 L/h.

III. Economies réalisées sur la facture énergétique :

Pour ce qui est des énergies, nous utiliserons de la biomasse plutôt qu'une chaudière électrique. La chaleur produite par nos 400 Kg de biomasse par jour est de 1876KWh/Jr. Nous utiliserons aussi le solaire photovoltaïque pour nous alimenter en électricité, ce qui revient à 4,76 KWh/Jr. L'énergie nécessaire au bon fonctionnement de notre unité est donc de 1880,76KWh/Jr.

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

Le prix de l'électricité étant de 4,18DA/KWh, le montant que l'on économise donc pour huit mois de travail par an est de 1 886 778,432DA [46].

Tableau 71 : Économies sur la facture énergétique.

Quantité de biomasse utilisée (Kg/Jr)	Apport énergétique biomasse (KWh/Jr)	Apport énergétique photovoltaïque (KWh/Jr)	Apport énergétique biomasse + photovoltaïque (KWh/Jr)	Apport énergétique annuel biomasse + photovoltaïque (KWh/An)	Economies sur la facture énergétique (DA)
400	1876,00	4,76	1880,76	451 382,40	1 886 778,432

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 (4 009 000 DA), et pour amortir cet investissement grâce aux économies réalisées sur la facture énergétique, il faut un certain nombre d'années.

L'intersection entre la droite représentant les investissements énergétiques du Mobilab, qui est constante dans le temps, et celle représentant les dépenses annuelles d'une unité classique utilisant de l'électricité, en supposant celles-ci constantes, nous donne le nombre d'années (N) nécessaires afin d'amortir l'investissement photovoltaïque.

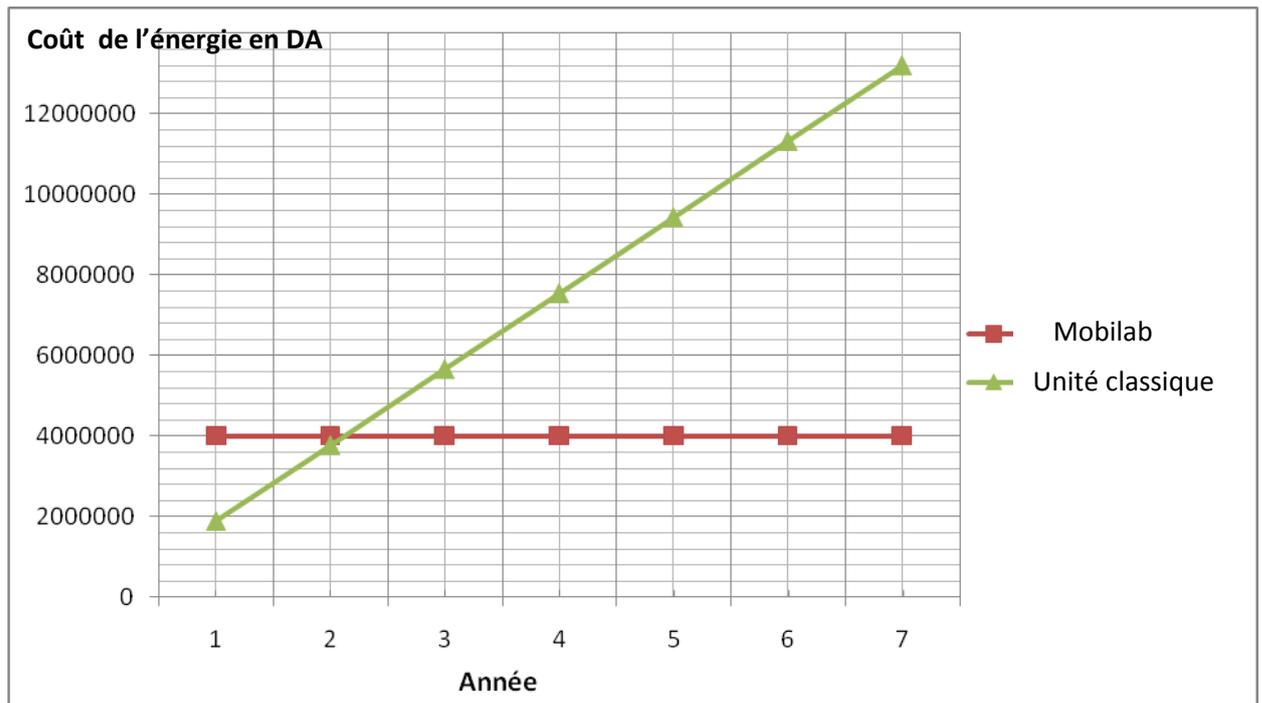


Figure 47 : Nombre d'années pour l'amortissement de l'investissement photovoltaïque par économie d'énergie.

On peut aussi le calculer à partir de la relation suivante :

$$N = \text{Le cout total de l'investissement énergétique} / \text{Economies sur la facture énergétique}$$

$$N = 4\,009\,000 / 1\,886\,778,432 = 2,12$$

On constate qu'il faut 2,12 années, soit 2 années, un mois et 14 jours pour amortir l'investissement photovoltaïque, seulement à partir des économies d'énergie réalisées grâce à l'utilisation du solaire et de la biomasse.

IV. 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 les quantités de gaz à effet de serre qu'émet une unité classique ayant la même capacité de production que la notre, et utilisant une chaudière électrique ou au fioul.

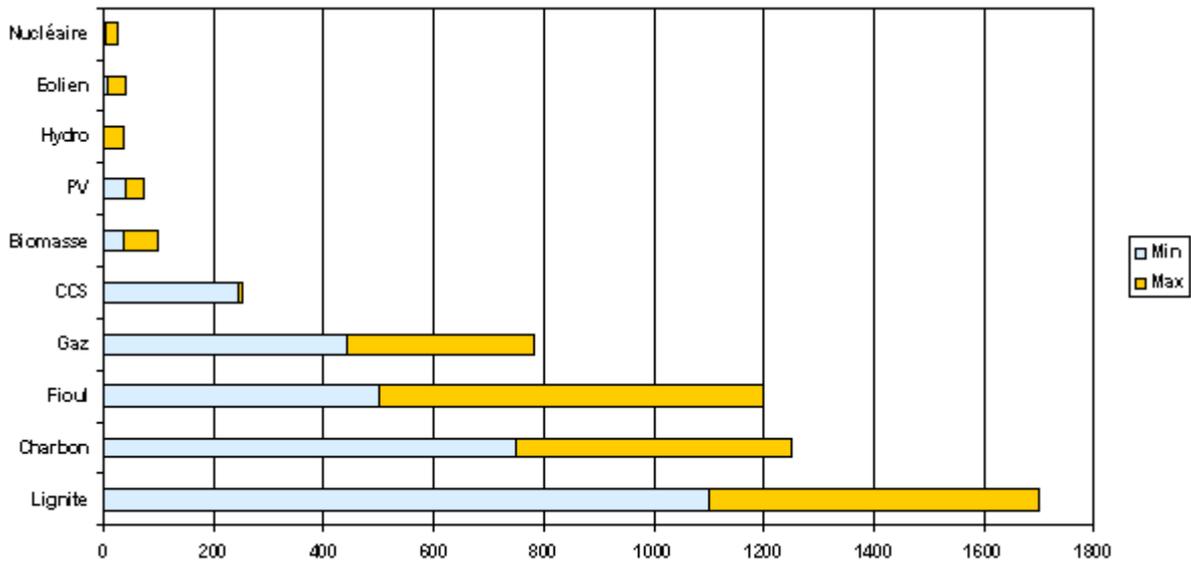


Figure 48 : Emissions de CO₂ par source énergétique (AIE 2006) [58]

La figure suivante reflète les émissions de CO₂ en fonction de leur source énergétique. Les fourchettes sont dues aux différences dans les méthodes d'évaluation, le rendement thermique et le périmètre pris en compte. Les émissions moyennes de CO₂ et de NO_x sont résumées dans ce tableau :

Tableau 72 : Émissions de CO₂ et de NO_x par source énergétique [58]

	Emissions de CO ₂ (g/kWh)	Emissions de NO _x (g/kWh)
Electricité	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 pris 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.
- Biomasse en circuit fermé: les arbres et les végétaux ne poussent que grâce à l'énergie du soleil, qu'ils stockent dans leur biomasse. 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. A condition que les plantes/forêts exploitées soient replantées [6].

IV.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 Emissions Kg de CO₂ par kWh

$$\text{Les émissions de CO}_2 = 451\,382,40 \times 0,9 = 406\,244,16 \text{ Kg/ an de CO}_2$$

Les émissions de NO_x = Apport énergétique annuel × Emissions Kg de NO_x par kWh

$$\text{Les émissions de NO}_x = 451\,382,40 \times 0,0002 = 90,28 \text{ Kg / an de NO}_x$$

Une unité ayant la même capacité de production que la notre, et utilisant une chaudière électrique pour l'extraction, et de l'électricité pour faire fonctionner la pompe et les ventilateurs, émettra 406,244 tonnes de CO₂ et 90,3 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 :

Les émissions de CO₂ = (Apport énergétique chaudière annuel × Emissions fioul Kg de CO₂ par kWh) +(Apport énergétique électrique annuel × Emissions électricité Kg de CO₂ par kWh)

$$\text{Les émissions de CO}_2 = (450\,240 \times 0,45) + (1142,4 \times 0,9) = 203\,636,16 \text{ Kg / an de CO}_2.$$

Les émissions de NO_x = (Apport énergétique chaudière annuel × Emissions fioul Kg de NO_x par kWh) +(Apport énergétique électrique annuel × Emissions électricité Kg de NO_x par kWh)

$$\text{Les émissions de NO}_x = (450\,240 \times 0,0006) + (1142,4 \times 0,0002) = 270,37 \text{ Kg / an de NO}_x$$

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 203,64 tonnes de CO₂ et 270,37 Kg de NO_x par an.

IV.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'elle le réabsorbe.

Les émissions de CO₂ = (Apport énergétique biomasse annuel × Emissions biomasse Kg de CO₂ par kWh) +(Apport énergétique PV annuel × Emissions PV Kg de CO₂ par kWh)

$$\text{Les émissions de CO}_2 = (450\,240 \times 0,1) + (1142,4 \times 0,05) = 45\,081,2 \text{ Kg / an de CO}_2$$

Les émissions de NO_x = (Apport énergétique biomasse annuel × Emissions biomasse Kg de NO_x par kWh) +(Apport énergétique PV annuel × Emissions PV Kg de NO_x par kWh)

$$\text{Les émissions de NO}_x = (450\,240 \times 0,0002) + (1142,4 \times 0,00016) = 90,23 \text{ Kg / an de CO}_2$$

Notre Mobilab émettra 45,08 tonnes de CO₂ et 90,23Kg de NO_x par an.

Tableau 73 : Comparatif des émissions de gaz à effet de serre

	Unité classique avec chaudière électrique	Unité classique avec chaudière au fioul	Mobilab (Biomasse+PV)
Emissions CO ₂ (T/an)	406,24	203,64	45,08
Emissions NO _x (Kg/an)	90,30	270,37	90,23

On constate que l'utilisation d'énergies renouvelables et propres dans notre unité nous a permis d'éviter le rejet de 361,16 tonnes de CO₂ par an par rapport à une unité fonctionnant à l'électricité, et 158,06 tonnes de CO₂ et 180,14 Kg de NO_x par an par rapport à une unité utilisant fioul et électricité.

D. Calcul économique

I. Marché des huiles essentielles en Algérie :

Dans tous les rayons, à toutes les sauces ... Les huiles essentielles sont partout.

En effet, le marché des huiles essentielles connaît un formidable essor dans le monde ces dernières années. Ceci est dû à leurs applications dans divers industries, telles que l'industrie pharmaceutique, cosmétique, des détergents ou de l'agroalimentaire, mais aussi au succès que rencontrent les produits bio depuis quelques temps.

En Algérie, bien que la production d'huiles essentielles existe, elle reste insuffisante, car 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. Des unités telles que notre Mobilab permettraient de répondre à cette demande, et seraient créatrices d'emplois et de débouchés pour l'agriculture Algérienne.

II. Estimation du coût opératoire :

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

II.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 [7].

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 de vapeur, quant à elle, est obtenue grâce à la combustion de la biomasse.

Notre biomasse est le résidu des plantes végétales dont on extrait l'arôme. 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 seuls produits utilisés par notre unité sont la matière végétale et l'eau. Comme nous travaillons en circuit fermé, nous ne consommons que très peu d'eau. Son coût est donc négligeable. 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.

Notre unité utilise 800 Kg/Jr de matière végétale, et fonctionne huit mois par an, elle en consomme donc 192 000 Kg par an. Le montant des charges variables sera alors de :

$$\text{Charges variables} = \text{coût de la matière première} = 30 \times 192000$$

$$\text{Charges variables} = \mathbf{5\,760\,000\,DA / an}$$

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

II.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 [7] :

II.2.1. Les charges fixes d'exploitation :

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

Pour le Mobilab, le coût total de l'investissement est de 11 730 000 DA, ce qui revient à un montant de charges fixes d'exploitation de 821 000 DA par an.

$$\text{Charges fixes d'exploitation} = \mathbf{821\,000\,DA / an}$$

II.2.2. Les charges fixes de capital :

Elles regroupent la dotation pour provision aux amortissements et les frais financiers, 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 [7] :

$$\mathbf{A=I/n}$$

Avec A: La dotation pour provisions aux amortissements ;

I : Les investissements ;

n : La durée d'amortissement.

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

Tableau 74 : Durée d'amortissement types de diverses installations

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

Nous aurons donc :

$$A = A_1 + A_2 + A_3 = I_1/n_1 + I_2/n_2 + I_3/n_3$$

Avec X_1 : Matériel de l'unité ;

X_2 : Installation photovoltaïque ;

X_3 : Camion.

$$A = (512350/10) + (4009000/25) + (4000000/5)$$

$$A = \text{dotation pour provisions aux amortissements} = 1\,011\,595 \text{ DA}$$

$$n = I/A = 11\,730\,000 / 1\,011\,595 = 11,6 \text{ ans.}$$

La durée d'amortissement de notre unité est en moyenne de 12 ans. Pour que notre installation dégage un bénéfice, il faut que le délais de retour sur investissement soit inférieur à la durée d'amortissement, et donc, inférieur à 12ans.

- 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%.

Tableau 75 : Financement de l'investissement

Unité	% de I	Capital (DA)
Apport en fond propre	30	3 519 000
Crédit à moyen terme	70	8 211 000
Total	100	11 730 000

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.

Tableau 76 : Calcul des intérêts d'investissement sur Excel

Prêt	82110 €				
Taux	8%				
Durée (ans)	5				
Périodes	1	2	3	4	5
INTPER	6 552,00 €	5 435,17 €	4 228,99 €	2 926,32 €	1 519,44 €

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 77 : Calcul des frais financiers sur Excel

Prêt	82110 €
Taux	8%
Durée (ans)	5
VPM	20 564,98 €

Le montant des frais financiers est donc de 2 056 498 DA par an.

Frais financiers = 2 056 498 DA/ an

II.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 78 : Salaires par catégorie professionnelle

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

Les charges comprendrons donc 85 000DA pour la main d'œuvre, soit 680 000DA par an.

Cout de la main d'œuvre = 680 000DA / an

Le cout opératoire est égal à la somme des charges variables, des charges fixes (d'exploitation et de capital), et du cout de la main d'œuvre [7].

Cout opératoire = Cout de la main d'œuvre + Frais financiers + Amortissements + Charges fixes d'exploitation + Charges variables

Tableau 79 : Résumé du cout opératoire

Charges variables	Charges fixes d'exploitation	Amortissements	Frais financiers	Main d'œuvre	Cout opératoire
5 760 000	821 000	1 011 595	2 056 498	680 000	10 329 093

Cout opératoire = 10 329 093 DA /an

III. 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 donc 800 Kg par jour de matière végétale.
- Le rendement des huiles essentielles varie entre 1% et 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 3840 Kg par an.
- Le prix moyen du Kg d'une huile essentielle pure est de 10 000DA.

$$V = \text{recettes annuelles} = \text{prix du Kg} \times \text{quantité produite en Kg/an} [7]$$

$$V = 10\,000 \times 3840$$

$$V = \mathbf{38\,400\,000\text{DA /an}}$$

IV. Le délais de retour sur investissement :

Le délais 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 [7] :

$$\mathbf{DRI = I / \text{Gain moyen annuel}}$$

Avec: Le gain moyen annuel = recettes annuelles - cout opératoire ;

$$\text{Le gain moyen annuel} = 38\,400\,000 - 10\,329\,093$$

$$\mathbf{\text{Le gain moyen annuel} = 28\,070\,907 \text{ DA / an.}}$$

$$\text{DRI} = 11\,730\,000 / 28\,070\,907$$

$$\mathbf{\text{DRI} = 0,42}$$

On constate que le délais de retour sur investissement est de moins de 5 mois. On est largement en dessous de la durée d'amortissement. Le projet est très rentable car l'unité coûte beaucoup moins cher qu'une unité classique ayant la même capacité de production.

En effet, en suivant le même schéma de calcul auquel nous avons intégré le coût de l'énergie pour une unité classique fixe, ayant la même capacité de production que la notre, et travaillant huit heures par jour huit mois par an, nous obtenons les résultats suivants :

- Investissements : 49 009 031 DA / an

- Coût opératoire : 22 154 639 DA / an => Gain moyen annuel : 16 245 361 DA / an

$$\mathbf{\text{DRI} = 3 \text{ ans}}$$

En se plaçant dans le cas le plus défavorable ou l'on ne travaille que 3 mois par an, on constate, en suivant le même schéma de calcul, que le gain moyen annuel sera de 10 183 907 DA / an, et le délais de retour sur investissement d'un an et deux mois.

Par mesure de sécurité, il serait préférable de commencer avec un petit Mobilab, et ne produire que 6 à 8 L par jour, puis passer au moyen ou au grand si la demande s'en fait ressentir.

Conclusion

Conclusion

Les huiles essentielles sont considérées, depuis plusieurs années, comme l'une des filières les plus prometteuses. Présentent dans de nombreuses industries, leur production connaît un formidable essor dans le monde.

En dépit des besoins croissants des industries nationales en huiles essentielles, l'Algérie n'en produit que très peu. Pourtant, de par la diversité de son climat et de ses sols, elle possède une flore particulièrement riche, ce qui lui confère une place privilégiée pour la culture et l'exploitation des plantes aromatiques et médicinales.

C'est donc dans le but d'exploiter cette filière que nous nous sommes intéressés à la conception d'une unité mobile d'extraction d'huiles essentielles, s'inscrivant dans le cadre du développement durable respectueux de l'environnement.

L'idée fondamentale est de multiplier les modules industriels mobiles de faible capacité au lieu des grands complexes industriels fixes, et d'y intégrer les énergies renouvelables, dans l'optique de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

À l'issue de cette étude, nous avons constaté qu'avec une installation simple, innovante et technologiquement réalisable, nous pouvions 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.
- 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.
- 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 serpentin 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 de la biomasse et du solaire photovoltaïque permet à l'unité d'être énergétiquement autonome, de réduire considérablement ses émissions de gaz à effet de serre et ses rejets solides.

Le Mobilab, sans nécessiter d'investissements considérables, permet de générer beaucoup de valeur ajoutée, tout en respectant le principe des trois E « Eau, Energie, Environnement ».

Une telle conception est créatrice de richesse, d'emplois et contribue au développement et à la diversification de l'agriculture. Elle peut être utilisée pour toute industrie agroalimentaire générant des rejets d'origine végétale (biomasse), telles que les huileries, l'industrie des jus de fruits et l'industrie sucrière.

Bibliographie

➤ Livres :

[1] M. TURGEON. -2001

"Profil des produits forestiers, Huiles Essentielles", Ministère des Ressources naturelles, Direction du développement de l'industrie des produits forestiers, Québec, Canada 4 p.

[2] J. GARNERO. –

"Huiles essentielles", Techniques de l'ingénieur, Dossier n° k345

[3] E. BOCCHIO. - 1985

"Natural essentials oils", Parfums Cosmét. Arômes, p 63.

[4] P. BAUD. - 1951

"Traité de chimie industrielle: Industries organiques" Tome III, Editions Masson&Cie, Paris, France, p713.

[5] A. RIOU. ET J.P. DEPAW. -1990

"Différents types de chaudières industrielles", Techniques de l'ingénieur, Dossier n° b1480.

[6] E. GUENTHER. -1972

"The essential oils, volume one, history-origin in plants production analysis", Ed E. Krieger, Florida, p87-201.

[7] A. CHAUVEL. , G. FOURNIER ET C. RAIMBAULT. - 2001

"Manuel d'évaluation économique des procédés", Editions TECHNIP, Paris, France, p77-382.

[8] R.M. DELL ET D.A.J. RAND. -2004

"Clean Energy", Editor James H Clark, University of New York, UK, p93, p125.

[9] E. GEORGIEV. ET A. STOYANOVA. -2000

"Handbook du spécialiste de l'industrie des arômes", UFT Academic Publishing House, Plovdiv, Bulgarie, p561.

[10] F. KREITH. - 1967

"Transmission de la chaleur et thermodynamique", Editions Masson&Cie, Paris, France, p266.

[11] H. PERRY ET H. CHILTON. - 1967

"Chemical Engineers' Handbook ", Ed. McGraw - Hill, 5ème édition, New-York, p10-11; p10-18.

[12] J. LEYBROS. ET P. FREMEAUX. -1993

"Extraction solide liquide", Techniques de l'ingénieur, Dossier n° J2780

[13] E. KOLLER. -2001
"Aide Mémoire Génie Chimique", Dunod, Paris, France, 457 p.

[14] A. BONTEMPS, A. GARRIGUE, C. GOUBIER, J. HUETZ ET C. MARVILLET. -1995
"Echangeurs de chaleur : Description des échangeurs", Techniques de l'ingénieur, n° B2341.

➤ **Thèses :**

[15] C.E. CHITOUR, L. ALLOUACHE. ET N. AZROU. -2008
"L'énergie électrique, état des lieux et prévisions 2030 ", 12^{ème} journée de l'énergie, E.N.P, Alger, Algérie, 35 p.

[16] F.R. AMRANI. ET A. BASTA. -2008
"Potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans une unité d'extraction d'huiles essentielles", Projet de fin d'études, E.N.P, Alger, Algérie, 103 p.

[17] F. TIFAOU. ET M. Si MEHAND. -2007
"Mise en œuvre d'une installation d'extraction solide/vapeur et solide/liquide à l'échelle semi pilote", Projet de fin d'études, E.N.P, Alger, Algérie, 71 p.

[18] C. BACHELOT, A. BLAISE, T. CORBEL ET A. LE GUERNIC. – 2006
"Les huiles essentielles", Travail d'études, U.C.O Bretagne Nord, France, 29 p.

➤ **Références électroniques :**

[19] www.ekopedia.org

[20] www.sciencedirect.com

[21] www.penntybio.com

[22] www.biogassendi.ifrance.com

[23] www.herbarom-laboratoire.com

[24] www.pagesperso-orange.fr/guy.chaumeton

[25] www.labo-hevea.com

[26] www.scopus.com

[27] www.azprocede.fr

[28] www.chaudières-barata.com

[29] www.chaudierevapeur.com

[30] Encarta 2009

[31] www.alquitaras.com

- [32] www.kappfrance.fr
- [33] www.nature-helps.com
- [34] www.lenntech.com
- [35] www.essentialoil.com
- [36] www.maguysama.free.fr
- [37] www.apere.org
- [38] www.cea.fr (Commissariat à l'Énergie Atomique)
- [39] www.techniques-ingenieur.fr
- [40] www.energie-photovoltaïque-et-solaire.com
- [41] www.hespul.org
- [42] www.tecsol.fr
- [43] www.kenergie.com
- [44] www.mem-algeria.org (Ministère des énergies et des mines Algérie)
- [45] www.energies-renouvelables.org
- [46] www.sonelgaz.dz
- [47] www.mkmbioenergia.hu
- [48] www.fao.org
- [49] www.alertes-meteo.com
- [50] www.acv.com
- [51] www.bati-depot.fr
- [52] www.demeco-isradem.com
- [53] www.jebatis.com
- [54] www.latuilerievictot.fr
- [55] www.fluidcontrol.fr
- [56] www.adera.asso.fr
- [57] www.audio.nouveauxobjets.com
- [58] www.iea.org

Annexes

Annexe 1

Fiche technique du container

Petit Mobilab 20 pieds	
Dimensions Intérieures	Longueur 6.00 m
	Largeur 2.30 m
	Hauteur 2.40 m
Ouverture de Portes	Largeur 2.286 m
	Hauteur 2.278 m
Poids du Tare	1 900 kg
Capacité en Volume	33.12 m3
Capacité de Chargement	22.100 kg
Prix (DA)	90 000
Mobilab Moyen 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 en Volume	49.68 m3
Capacité de Chargement	24 749 kg
Prix (DA)	100 000
Grand Mobilab 45 pieds	
Dimensions Intérieures	Longueur 13.70 m
	Largeur 2.40 m
	Hauteur 2.60 m
Ouverture de Portes	Largeur 2.340 m
	Hauteur 2.585 m
Poids du Tare	4110 kg
Capacité en Volume	85.5 m3
Capacité de Chargement	28.390 kg
Prix (DA)	120 000

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	0,6 3	Brique Réfractaire	200	180
	Profondeur	0,7			
	Longueur	1,2			
Conduit de fumées	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	10,3-1,4			
Conduit d'aération	Diamètre	0,25	Acier inoxydable		3,14
	Longueur	0,8			
Ballon d'eau	diamètre	0,3	Acier inoxydable		2
Poids total (kg)	518,64-521,44				
Puissance de la cheminée (KW)	Petit Mobilab	Moyen Mobilab		Grand Mobilab	
	82,07	164,15		328,3	
Capacité de la cheminée (Kg)	130				
Prix de la brique(DA)	35 940				
Prix du conduit de fumées(DA)	7040				
Prix conduit d'aération	1382				
Prix du silo(DA)	4752-6237				
Prix de la charpente(DA)	6700				
Prix du ballon(DA)	1050				

Annexe 3

Fiche technique des caissons mobiles

	Dimensions (m)		Nature du matériau	Poids (Kg)	Capacité (Kg)	Prix (DA)
Caisson mobile	Hauteur	1,0 (m)	Acier inoxydable	22	100	11 000
	Profondeur	0,6 (m)				
	Longueur	1,0 (m)				
Conduites	Diamètre	0,030/0,032	PEHD	0,8		900
	Longueur	4				
Robinet de vidange	Diamètre	0,015/0,021	Corps laiton nickelé	4,3		500

	Petit Mobilab	Mobilab Moyen	Grand Mobilab
Biomasse à traiter kg/ jour	400	800	1600
Nombre de caissons nécessaires	2	4	8
Nombre de caissons dans le Mobilab	4	6	10
Prix (DA)	44 000	66 000	110 000

Annexe 4

Fiche technique du condenseur

			Petit Mobilab	Mobilab Moyen	Grand Mobilab	Nature du matériau
Serpentin	Dimensions (m)	Diamètre	0,030/0,032	0,030/0,032	0,030/0,032	Acier inoxydable
		Longueur	14,13	28,26	56,52	
	Nombre de rangées		8	16	32	
	Overall UA (KJ/h.°C)		5540.92	11081,83	22163.66	
	Poids (kg)		9,6	19,2	38,4	
	Prix (DA)		1814	3628	7256	
Ventilateurs	Nombre		4	8	16	
	Diamètre (m)		0,500	0,500	0,500	
	Consommation électrique (W)		240 (60×4)	480 (60×8)	960 (60×16)	
	Débit d'air (m ³ /h)		2500	2500	2500	
	Prix (DA)		30 000 (7500×4)	60 000 (7500×8)	120 000 (7500×16)	

Annexe 5

Fiche technique du décanteur

		Petit Mobilab	Mobilab Moyen	Grand Mobilab	Nature du matériau
Décanteur	Hauteur (m)	0,3	0,3	0,3	Vase florentin en cuivre
	Volume (m ³)	0,01	0,02	0,04	
	Hauteur de la sortie de l'huile essentielle	0,2	0,2	0,2	
	Nombre de décanteurs	2	2	2	
	Poids (kg)	2,0	3,1	4,2	
	Prix (DA)	20 480	28 560	42 500	
Entonnoir	Prix (DA)	900			Acier inoxydable
Robinet de vidange	Diamètre (m)	0,015/0,021	0,015/0,021	0,015/0,021	Corps laiton nickelé
	Poids (Kg)	4,3	4,3	4,3	
	Prix (DA)	500	500	500	
Récipient huiles essentielles	Volume (m ³)	0,003	0,006	0,012	Acier inoxydable
	Nombre	2	2	2	
	Prix (DA)	800	1000	1300	

Annexe 6

Algorithme d'établissement des abaques des figures et (dimensionnement d'un décanteur) :

```
%importer les matrices
plot3(d208v1(:,1),d208v1(:,2),d208v1(:,3),'-k');
hold;

plot3(d208v2(:,1),d208v2(:,2),d208v2(:,3),'-k');
plot3(d208v4(:,1),d208v4(:,2),d208v4(:,3),'-k');
plot3(d208v6(:,1),d208v6(:,2),d208v6(:,3),'-k');
plot3(d208v8(:,1),d208v8(:,2),d208v8(:,3),'-k');
plot3(d208v10(:,1),d208v10(:,2),d208v10(:,3),'-k');
plot3(d208v21(:,1),d208v21(:,2),d208v21(:,3),'-k');

plot3(d2082v1(:,1),d2082v1(:,2),d2082v1(:,3),'-b');
plot3(d2082v2(:,1),d2082v2(:,2),d2082v2(:,3),'-b');
plot3(d2082v4(:,1),d2082v4(:,2),d2082v4(:,3),'-b');
plot3(d2082v6(:,1),d2082v6(:,2),d2082v6(:,3),'-b');
plot3(d2082v8(:,1),d2082v8(:,2),d2082v8(:,3),'-b');
plot3(d2082v10(:,1),d2082v10(:,2),d2082v10(:,3),'-b');
plot3(d2082v21(:,1),d2082v21(:,2),d2082v21(:,3),'-b');

plot3(d2084v1(:,1),d2084v1(:,2),d2084v1(:,3),'-y');
plot3(d2084v2(:,1),d2084v2(:,2),d2084v2(:,3),'-y');
plot3(d2084v4(:,1),d2084v4(:,2),d2084v4(:,3),'-y');
plot3(d2084v6(:,1),d2084v6(:,2),d2084v6(:,3),'-y');
plot3(d2084v8(:,1),d2084v8(:,2),d2084v8(:,3),'-y');
plot3(d2084v10(:,1),d2084v10(:,2),d2084v10(:,3),'-y');
plot3(d2084v21(:,1),d2084v21(:,2),d2084v21(:,3),'-y');

plot3(d2086v1(:,1),d2086v1(:,2),d2086v1(:,3),'-g');
plot3(d2086v2(:,1),d2086v2(:,2),d2086v2(:,3),'-g');
plot3(d2086v4(:,1),d2086v4(:,2),d2086v4(:,3),'-g');
plot3(d2086v6(:,1),d2086v6(:,2),d2086v6(:,3),'-g');
plot3(d2086v10(:,1),d2086v10(:,2),d2086v10(:,3),'-g');
plot3(d2086v21(:,1),d2086v21(:,2),d2086v21(:,3),'-g');

plot3(d2088v1(:,1),d2088v1(:,2),d2088v1(:,3),'-r');
plot3(d2088v2(:,1),d2088v2(:,2),d2088v2(:,3),'-r');
plot3(d2088v4(:,1),d2088v4(:,2),d2088v4(:,3),'-r');
```

```
plot3(d2088v10(:,1),d2088v10(:,2),d2088v10(:,3),'-r');  
plot3(d2088v21(:,1),d2088v21(:,2),d2088v21(:,3),'-r');
```

```
plot3(d2090v1(:,1),d2090v1(:,2),d2090v1(:,3),'-m');  
plot3(d2090v2(:,1),d2090v2(:,2),d2090v2(:,3),'-m');  
plot3(d2090v4(:,1),d2090v4(:,2),d2090v4(:,3),'-m');  
plot3(d2090v6(:,1),d2090v6(:,2),d2090v6(:,3),'-m');  
plot3(d2090v8(:,1),d2090v8(:,2),d2090v8(:,3),'-m');  
plot3(d2090v10(:,1),d2090v10(:,2),d2090v10(:,3),'-m');  
plot3(d2090v21(:,1),d2090v21(:,2),d2090v21(:,3),'-m');
```

```
plot3(d2092v1(:,1),d2092v1(:,2),d2092v1(:,3),'-c');  
plot3(d2092v2(:,1),d2092v2(:,2),d2092v2(:,3),'-c');  
plot3(d2092v4(:,1),d2092v4(:,2),d2092v4(:,3),'-c');  
plot3(d2092v6(:,1),d2092v6(:,2),d2092v6(:,3),'-c');  
plot3(d2092v8(:,1),d2092v8(:,2),d2092v8(:,3),'-c');  
plot3(d2092v10(:,1),d2092v10(:,2),d2092v10(:,3),'-c');  
plot3(d2092v21(:,1),d2092v21(:,2),d2092v21(:,3),'-c');
```

```
plot3(d2094v1(:,1),d2094v1(:,2),d2094v1(:,3),'b');  
plot3(d2094v2(:,1),d2094v2(:,2),d2094v2(:,3),'b');  
plot3(d2094v4(:,1),d2094v4(:,2),d2094v4(:,3),'b');  
plot3(d2094v6(:,1),d2094v6(:,2),d2094v6(:,3),'b');  
plot3(d2094v8(:,1),d2094v8(:,2),d2094v8(:,3),'b');  
plot3(d2094v10(:,1),d2094v10(:,2),d2094v10(:,3),'b');  
plot3(d2094v21(:,1),d2094v21(:,2),d2094v21(:,3),'b');
```

```
plot3(d096v1(:,1),d096v1(:,2),d096v1(:,3),'r');  
plot3(d096v2(:,1),d096v2(:,2),d096v2(:,3),'r');  
plot3(d096v4(:,1),d096v4(:,2),d096v4(:,3),'r');  
plot3(d096v6(:,1),d096v6(:,2),d096v6(:,3),'r');  
plot3(d096v8(:,1),d096v8(:,2),d096v8(:,3),'r');  
plot3(d096v10(:,1),d096v10(:,2),d096v10(:,3),'r');  
plot3(d096v21(:,1),d096v21(:,2),d096v21(:,3),'r');
```

```
grid on
```

```
legend ('Densité 0.8','Densité 0.82','Densité 0.84','Densité 0.86','Densité 0.88','Densité  
0.9','Densité 0.92','Densité 0.94','Densité 0.96',1
```

Annexe 7

Fiche technique de la pompe

Dimensions (m)	Hauteur	Longueur	Profondeur
	0,305	0,136	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	2		
Prix	15 000		

Annexe 8

Fiche technique de l'installation Photovoltaïque

	Petit Mobilab	Moyen Mobilab	Grand Mobilab
Production électrique (Wh)	2840	4760	8600
Nombre total de modules	18	30	56
Surface approximative des modules (m ²)	9	15	28
Orientation (°)/Sud	0	0	0
Inclinaison la plus favorable (°)	15	15	15
Intensité maximum de charge (A)	26,25	43,75	40,83
Investissement Hors Taxes			
Total investissement	22,41 (k€)	36,89 (k€)	65,09(k€)
Ingénierie	2,43 (k€)	3,2 (k€)	5,18(k€)
Total projet	24,84 (k€)	40,09 (k€)	70,27(k€)

Panneau photovoltaïque			
Dimensions (m)	Epaisseur	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		

			Petit Mobilab	Mobilab Moyen	Grand Mobilab
Batterie	Dimensions (mm)	Hauteur	688	630	815
		Longueur	235	392	400
		Largeur	220	211	223
	Nbre jours d'autonomie		5	5	5
	Profondeur de décharge maxi (%)		70	70	70
	Tension batterie (V)		24	24	48
	Tension de distribution (V)		230	230	230
	Capacité batterie (AhC100)		1000	1700	1800
	Durée de recharge (h)		38	38	39
	Taux de cyclage nominal journalier (%)		11,83	11,67	11,2
	Poids (Kg)		80	95	160

			Petit Mobilab	Mobilab Moyen	Grand Mobilab
Onduleur	Dimensions (mm)	Hauteur	86	195	205
		Longueur	150	120	408
		Largeur	160	350	143
	Tension entrée onduleur (V)		24	24	48
	Puissance installée (W)		345	595	1075
	Puissance maxi au démarrage (W)		645	1005	1725
	Puissance onduleur conseillée (VA)		400	600	1100
	Poids		2,1	11,3	18,0

			Petit Mobilab	Mobilab Moyen	Grand Mobilab
Chargeur	Dimensions (mm)	Hauteur	49	75	100
		Longueur	188	340	190
		Largeur	128	190	385
	Capacité chargeur (A)		50	85	80
	Puissance chargeur (W)		1900	3300	6100
	Puissance mini du groupe (VA)		2760	4680	8640
	Poids (Kg)		0,5	4,2	5,0

			Petit Mobilab	Mobilab Moyen	Grand Mobilab
Kit d'intégration toiture	Dimensions (mm)	Nombre	1	2	3
		Longueur	2,35	2,35	2,35
		Largeur	3,90	3,04 - 3,47	3,90-3,90-4,40
	Type de kit		Cadres avec rails de fixation et pieds amovibles		
	Matériau		Charpente métallique cornière en U en acier inox		
	Prix (DA)		3000	5000	8000

Annexe 9

Fiche technique tuyauterie, instrumentation et sécurité

			Petit Mobilab	Mobilab Moyen	Grand Mobilab
Tuyauterie	Dimensions (m)	Diamètre	0,030/0,032	0,030/0,032	0,030/0,032
		Longueur	8,55	11,7	15,7
	Matériau		Acier inoxydable		
	Poids (Kg)		1,5	1,9	2,5
	Prix (DA)		1000	1400	1840

		Nombre	Prix (DA)
Instrumentation	Vannes	5	60 000
	Débitmètres	5	150 000
	Capteurs	1	12 000
	Soupape	1	2 500
	Indicateur de niveau	1	3 000
	Citerne (310 l)	1	3 000

			Petit Mobilab	Mobilab Moyen	Grand Mobilab
Sécurité	Portes	Nombre	2	2	2
		Hauteur(m)	2,0	2,0	2,0
		Largeur(m)	1,2-0,9	1,2	1,2
		Matériau	Acier, cadre cornière U en inox		
		Prix (DA)	5500-4100	5500x2	5500x2
	Issues de secours	Nombre	2	3	3
		Hauteur(m)	1,0	1,0	1,0
		Largeur(m)	0,8	0,8	0,8
		Matériau	Verre, cadre cornière U en inox		
		Prix (DA)	6500x2	6500x3	6500x3
	Extincteurs	Nombre	3	3	3
		Prix (DA)	2500 x 3	2500 x 3	2500 x 3
	Ventilateurs de plafond	Nombre	1	2	2
		Consommation(Wh)	320	320	320
		Prix (DA)	4000x1	4000x2	4000x2
	Echelles	Longueur (m)	3,0		
		Prix (DA)	10 000		