



Projet de fin d'études

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Génie Chimique

Portant sur

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

Dirigé par le Pr. BENYOUSSEF E-H

Présenté par

Mlle BASTA Amira

Mlle AMRANI Fatma-Rym

Soutenu le 18 Juin 2008 devant le jury composé de :

Mr CHITOUR C-E. Président
Mme MEFTI A. Examineur
Mr AHMED ZAID T. Examineur
Mr BENYOUSSEF E-H. Rapporteur

Promotion 2008

Remerciements

Je tiens à remercier

Mes parents qui me témoignent leur soutien et leur amour,

Ma sœur et mon neveu qui ne peuvent être présents en ce jour,

Mon petit frère que j'adore,

Toi Wassim,

Tout ceux qui me sont cher,

Je remercie aussi Tous mes enseignants qui ont cru en moi bien que je sois la plus jeune de ma promotion.

Mon Professeur Benyoussef, pour sa présence, ses encouragements, ses précieux conseils ainsi que la qualité de son enseignement.

Le Professeur Chitour pour avoir accepté de présider notre jury.

Mme Mefti et Mr Ahmed Zaid pour avoir accepté d'être membre de notre jury.

Mon binôme Rym.

Amira 21ans

Remerciements

A l'issue de ce travail, je tiens à remercier :

Mes parents pour leur soutien moral, affection, et énormes sacrifices, et mon père pour son aide, sa patience et ses conseils tout au long de la rédaction de ce travail,

Mes adorables petites sœurs Nacila et Neila,

Mes grands-parents paternels et maternels que j'aime tendrement,

Dedda qui a toujours été à mes côtés lorsque j'ai eu besoin de lui,

Mes tantes Nenna, Feriel et Lila qui m'apportent en permanence un soutien, chacune à sa manière,

Je remercie également :

Monsieur Benyoussef E-H. pour sa disponibilité, sa patience, son aide, sa gentillesse et la richesse de son opinion et de ses critiques,

Monsieur Chitour C-E. pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury,

Madame Mefti A. et Mr Ahmed Zaid T. d'avoir bien voulu examiner notre travail, Amira, mon binôme, pour le travail que nous avons accompli,

Ma très chère amie Louisa qui a toujours été là pour moi et mes amies d'enfance Nesrine et Fatima,

Mes amis grâce à qui j'ai pu passer de très belles années à L'E.N.P. et avec qui j'ai partagé d'inoubliables moments : Zico, Mehdi, Azzedine, Yanis, Karima, Djazia et Mounir,

Une personne très particulière pour moi et qui est toujours à mes côtés Nazim.

Rym Fatma

ملخص / Abstract / Résumé

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

هذه الدراسة تدور حول التخطيط النظري لوحدة متنقلة لاستخلاص بالتمرين ببخار الماء الزيوت الأساسية. لقد خططنا هذه الأخيرة لغرض أولا اقتصاد الطاقة بإدماج الطاقات المتجددة (الطاقة الشمسية و الطاقة النباتية) و بعدها اقتصاد الماء باستعمال لتبريد بخار الماء المحمل بالزيوت الأساسية مبرد هوائي الذي يستعمل الهواء عوض الماء. إن تكلفت انجاز هذه التركيبية و الاقتصاد المتولد على مستوى هذه بفضل استعمال الطاقات المتجددة و اقتصاد الماء يشير ان أن الوحدة تعتبر اقتصادية و بيئية.

الكلمات الافتتاحية

وحدة متنقلة - استخلاص الزيوت الأساسية - الطاقات المتجددة - الطاقة النباتية-الطاقة الشمسية - اقتصاد الماء- المبرد الهوائي

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

Résumé

Cette étude porte sur la projection théorique d'une unité mobile d'extraction par entraînement à la vapeur d'eau d'huiles essentielles.

Nous avons projeté celle-ci dans le souci d'abord d'économiser l'énergie en y intégrant des énergies renouvelables (l'énergie solaire et la biomasse), et ensuite d'économiser l'eau en utilisant pour le refroidissement de la vapeur d'eau chargée en huile essentielle un aérorefrigérant utilisant l'air à la place d'un condenseur à eau.

Les estimations du coût de réalisation de l'installation et des économies induites au niveau de celle-ci grâce au recours aux énergies renouvelables et à l'économie d'eau indiquent que l'unité est économiquement viable et écologique.

Mots-clés : Unité mobile - Extraction d'huiles essentielles - Energies renouvelables -Biomasse - Solaire - Economie d'eau - aérocondenseur - cohobage.

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

Abstract

A mobile plant for the extraction of essential oils, involving water driving process was projected in this study.

This plant was conceived in order to integrate renewable energy sources (solar and biomass conversion) and to save water by mean of the use of a vacuum steam condenser device instead of a classical water steam condenser to cool the extraction vapour.

The costs estimates of carrying out the installation and those resulting from the savings due to integration of renewable energy sources to the project indicate that the unit plant is economically viable and ecologically friendly.

Key Words: Mobile extraction unit- Essential oils - Renewable energy - Biomass - Solar –Water savings – Vacuum steam condenser – Cohobation.

Sommaire

Introduction

1

Partie I Généralités

Les huiles essentielles

I. Définition de quelques extraits naturels.....	2
II. Définition d'une huile essentielle.....	2
III. Utilisations des huiles essentielles	3
IV. Composition des huiles essentielles.....	3
V. Caractéristiques des huiles essentielles	4
V.1. Caractéristiques organoleptiques :	4
V.2. Caractéristiques physiques :	4
V.3. Caractéristiques chimiques :	5
VI. Propriétés physiques des huiles essentielles	5
VII. Propriétés chimiques des huiles essentielles	5
VIII. Stockage et conservation des huiles essentielles.....	5

Procédés d'extraction des huiles essentielles

I. Hydrodistillation	6
II. Distillation par entraînement à la vapeur d'eau	7
La Cohobation (ou cohobage)	7
III. Hydrodiffusion	9
IV. Extraction par solvant	9
V. Extraction par expression	10
VI. Extraction par enfleurage.....	10

VII. Extraction par CO2 Supercritique	10
---	----

Unité classique d'extraction d'huiles essentielles

I. Chaudière	11
II. Extracteur ou alambic	12
III. Condenseur	13
IV. Décanteur (essencier ou vase florentin)	14
IV.1. Principe du vase florentin	14
IV.2. Matériau utilisé pour l'essencier	15
IV.3. Phénomènes physiques dans un essencier	15
IV.3.1. La décantation	15
IV.3.2. La coalescence	16

Les sources d'énergie renouvelables

I. Biomasse	17
I.1. Définition de la biomasse	17
I.2. Combustion directe de la biomasse	17
I.3. Biogaz	18
I.4. Biocarburants	18
I.5. Production d'électricité à partir de la biomasse	18
I.6. Caractéristiques physiques et chimique de la biomasse	19
I.6.1. Humidité	19
I.6.2. Granulométrie	19
I.6.3. Masse volumique	19
I.6.4. Teneur en cendres	19
I.6.5. Composition chimique de la biomasse	20
I.7. Chaudière biomasse	20
I.7.1. Foyer	20
I.7.2. Échangeur de chaleur	20
II. Énergie solaire	21
II.1. Généralités sur le rayonnement solaire	21
II.2. Panneaux solaires ou capteurs solaires	21
II.3. Types de panneaux solaires	21
II.3.1. Panneaux solaires photovoltaïques	22
II.3.2. Panneaux solaires thermiques (chauffe-eau solaires)	23

II.4. Le potentiel solaire en Algérie.....	27
--	----

Partie II

Audit énergétique et solutions écologiques

Préambule.....	29
Potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans l'unité d'extraction mobile	
I. Description de l'installation	31
II. Le Mobilab (Figures 14A, 14B, 14C et 14D).....	32
III. Production d'énergie par la biomasse.....	37
IV. Production d'énergie par les capteurs solaires	37
IV.1. Présentation du logiciel SOLO 2000 utilisé.....	37
IV.2. Détermination de la surface utile	38
IV.3. Détermination du nombre de panneaux solaires	38
IV.4. Inclinaison et orientation des panneaux solaires	39
IV.5. Définition du coefficient du rendement optique et du coefficient de pertes	39
IV.6. Détermination du type d'installation	39
IV.7. Détermination du volume du ballon d'eau chaude	39
IV.8. Détermination de la constante de refroidissement	39
IV.9. Détails des calculs de l'apport énergétique des panneaux solaires.....	40
IV.9.1. Démarche adoptée.....	40
IV.9.2. Détermination des besoins énergétiques	41
IV.9.3. Exemple de calcul	42
Dimensionnement de l'aérocondenseur	
I. Description des réfrigérants	51
I.1. Réfrigérants secs	51
I.1.1. Aéroréfrigérants	51
I.1.2. Aérocondenseurs.....	52
I.2. Réfrigérants humides	52
II. Description générale.....	52
III. Description schématisée.....	53
IV. Description mathématique	54

IV.1. Estimation des chaleurs spécifiques moyennes.....	54
IV.1.1. Chaleur spécifique moyenne dans l'intervalle de température [25,100°C]	55
IV.1.2. Chaleur spécifique moyenne dans l'intervalle de température [100,105°C]	55
IV.2. Détermination du rapport thermique.....	56
IV.3. Détermination de l'énergie nécessaire au refroidissement.....	56
IV.4. Détermination des températures d'entrée et de sortie de l'aérocondenseur.....	56
IV.5. Estimation des différentes quantités de chaleur échangées.....	57
IV.5.1. Estimation de la chaleur de désurchauffe.....	57
IV.5.2. Estimation de la Chaleur de condensation.....	57
IV.5.3. Estimation de la Chaleur de refroidissement.....	57
IV.5.4. Estimation de la Chaleur totale échangée.....	58
IV.6. Détermination de la charge calorifique réduite.....	58
IV.7. Détermination de la résistance globale.....	58
IV.8. Calcul du coefficient d'échange global.....	59
IV.9. Détermination du nombre de rangées et de la vitesse faciale de l'air.....	59
IV.10. Calcul de la puissance absorbée.....	61
IV.11. Calcul de la température de sortie de l'air chaud.....	62
IV.12. Calcul de la DTLM.....	62
IV.13. Calcul de la surface d'échange.....	63
V. Economie d'eau réalisée par l'utilisation d'un aérocondenseur.....	64
V.1. Détermination des différentes quantités de chaleur échangées.....	64
V.1.1. Détermination de la quantité de chaleur nécessaire pour la désurchauffe de l'eau.....	64
V.1.2. Calcul de la quantité de chaleur nécessaire pour la condensation l'eau ..	64
V.1.3. Calcul de la quantité de chaleur nécessaire pour le refroidissement de l'eau.....	64
V.1.4. Quantité de chaleur totale nécessaire.....	64
V.2. Températures d'entrée et de sortie des fluides.....	64
V.3. Détermination du débit d'eau de refroidissement nécessaire.....	65
Dimensionnement du décanteur	66
I.1. Forces agissantes sur la vitesse d'ascension de la gouttelette d'huile essentielle	66
I.2. Vitesse de sédimentation de la gouttelette.....	68
I.3. Viscosités et densités des différentes huiles essentielles.....	69
I.4. Représentation de la vitesse d'ascension de la gouttelette d'huile essentielle.....	70

I.4.1. Régime laminaire	70
I.4.2. Régime intermédiaire.....	72
I.4.3. Régime turbulent.....	73
II. Vitesse d'ascension en fonction de la densité, de la viscosité et du diamètre de la gouttelette d'huile essentielle.....	76
II.1. Régime laminaire.....	76
II.2. Régime intermédiaire.....	76
III. Dimensionnement du décanteur.....	79

Partie III

Etude technico-économique et environnement

Estimation du coût total de l'installation	80
I. Détermination du prix du Mobilab	80
II. Détermination du prix de l'installation solaire.....	80
III. Détermination du prix du brûleur biomasse.....	81
III. Détermination du prix du silo	81
III.1. Etablissement du prix de base	82
III.2. Etablissement du prix du silo	83
IV. Détermination du prix de l'extracteur	83
IV.1. Détermination du poids de la virole	84
IV.2. Etablissement du prix de base de la virole	84
IV.3. Détermination du prix du l'extracteur	85
V. Détermination du prix de l'aérocondenseur.....	85
V.1. Etablissement du prix de base	85
V.2. Détermination du prix de l'aérocondenseur.....	86
VI. Détermination du prix du décanteur.....	89
VII. Détermination du coût total de l'installation.....	89
Economies sur la facture énergétique	91
Amortissement de l'investissement par économie d'énergie	92
Environnement	93

Conclusion 94

Bibliographie 97

Annexes 99

Liste des tableaux

Tableau I: Potentiel solaire en Algérie pour différentes régions.....	27
Tableau II: Dimensions du Mobilab en déplacement.....	32
Tableau III: Dimensions du Mobilab en exploitation.	32
Tableau IV: Pouvoir calorifique, teneur en humidité et teneur en cendres de quelques sources de biomasse végétale	37
Tableau VI: Caractéristiques dimensionnelles et pondérales du capteur unitaire retenu	38
Tableau VII: Caractéristiques et réglages de l'inclinaison et de l'orientation des panneaux solaires du Mobilab.	40
Tableau VIII: Température extérieur et température de l'eau en fonction des mois de l'année	41
Tableau IX: Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour $V=80l/j$	43
Tableau X: Taux de couverture solaire obtenu $V=80l/j$	43
Tableau XI: Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour $V=400l/j$	44
Tableau XII: Taux de couverture solaire obtenu $V=400l/j$	44
Tableau XIII: Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour $V=800l/j$	45
Tableau XIV: Taux de couverture solaire obtenu $V=800l/j$	45
Tableau XV: Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour $V=1600l/j$	46
Tableau XVI: Taux de couverture solaire obtenu $V=1600l/j$	46
Tableau XVII: Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour $V=4000l/j$	47
Tableau XVIII: Taux de couverture solaire obtenu $V=4000l/j$	47
Tableau XIX: Besoins énergétiques en fonction du débit volumique.	48
Tableau XX: Pourcentage de contribution de l'énergie solaire et de la biomasse au recouvrement des besoins de production de vapeur d'eau.	49
Tableau XXI: Contribution de l'énergie solaire et de la biomasse au recouvrement des besoins de production de vapeur d'eau en considérant les déperditions.	50
Tableau XXII: Chaleur de surchauffe en fonction des débits de vapeur.....	57

Tableau XX111: Chaleur de condensation en fonction des débits de vapeur.	57
Tableau XXIV: Chaleur de refroidissement en fonction des débits de vapeur.	58
Tableau XXV: Chaleur totale échangée en fonction des débits de vapeur.....	58
Tableau XXVI: Charge calorifique réduite en fonction des débits de vapeur.....	58
Tableau XXVII: Résistance globale pour différents fluides (aérocondenseur).	59
Tableau XXVIII: Coefficient de film extérieur et vitesse faciale de l'air.	60
Tableau XXIX: Puissance absorbée en fonction des débits de vapeur.....	62
Tableau XXX: Surface d'échange de l'aérocondenseur en fonction des débits de vapeur.	63
Tableau XXXI: économie d'eau en fonction des débits de vapeur.....	65
Tableau XXXII: Densité et Viscosité de quelques huiles essentielles.	69
Tableau XXXIII: Coefficients de corrélation pour les différentes huiles essentielles, en régime laminaire.....	71
Tableau XXXIV: Coefficients de corrélation pour les différentes huiles essentielles, en régime intermédiaire.	73
Tableau XXXV: Coefficients de corrélation pour les différentes huiles essentielles, en régime transitoire.	75
Tableau XXXVI: Caractéristiques du ballon de l'installation solaire.	80
Tableau XXXVII: Prix des capteurs solaires de 2.32 m ² selon leur nombre.	81
Tableau XXXVIII: Caractéristiques du brûleur biomasse.	81
Tableau XXXIX: Influence de la nature du matériau pour les réservoirs d'une capacité inférieure à 10 m ³ (pression atmosphérique)	83
Tableau XXXX: Prix de base d'un aérocondenseur pour l'année 2000.	86
Tableau XXXXI: Facteurs correctifs choisis pour la détermination du prix de l'aérocondenseur.	87
Tableau XXXXII: Prix de l'aérocondenseur pour l'année 2000.....	87
Tableau XXXXIII: Prix de l'aérocondenseur.....	87
A : Influence de l'épaisseur des tubes.....	88
B : Influence de la pression.	88
C : Influence de la longueur des tubes.	88

D : Influence du nombre de rangées.....	88
E : Influence de la nature du matériau employé.....	88
Tableau XXXXIV : Facteurs correctifs de prix des aérocondenseurs.....	88
Tableau XXXXV : Dimensions du décanteur de l'installation.	89
Tableau XXXXVI : Décomposition du coût total de revient pour un débit de vapeur 800l/jour.	89
Tableau XXXXVII : Décomposition du coût total de revient pour un débit de vapeur 1600l/jour.	90
Tableau XXXXVIII : Économies sur la facture énergétique.	91
Tableau XXXXIX : Nombre d'années pour l'amortissement de l'investissement par économie d'énergie.	92
Tableau XXXXX : Émissions de CO ₂ et de NO _x dues à la production d'électricité.	93
Tableau XXXXXI : Émissions évitées de CO ₂ et de NO _x en fonction des débits de vapeur.	93

Liste des figures

Figure 1: Dispositif d'hydrodistillation	6
Figure 2: Dispositif de la distillation par entraînement à la vapeur d'eau.....	7
Figure 3: principe de l'entraînement à la vapeur d'eau avec cohobage	8
Figure 4: Extracteur par solvant.....	9
Figure 5: Extraction par enflourage de pétales de rose	10
Figure 6 : Alambic classique.....	13
Figure 7: Essencier pour séparation des huiles légères et des huiles lourdes.	14
Figure 8: Principe de fonctionnement du vase florentin.	15
Figure 9: Influence de l'orientation des panneaux solaires sur la production énergétique	24
Figure 10: Eléments du chauffe eau solaire.	25
Figure 11: Chauffe-eau solaire "monobloc"	26
Figure 12: Chauffe-eau solaire à "thermosiphon" à éléments séparés	26
Figure 13: Chauffe-eau solaire à éléments séparés avec pompe et régulation.....	27
Figure 14: Irradiation solaire annuelle moyenne reçue sur plan incliné	28
Figure 15: Dimensions de la surface utile (su) et la surface hors tout (SHT).....	38
Figure 16: Type de chauffe eau choisi (à circulation forcée)	39
Figure 17: Schéma d'un aérocondenseur sec.	53
Figure 18: Représentation schématique de l'échange thermique.	53
Figure 19: évolution de la chaleur spécifique de l'eau en fonction de la température.	54
Figure 20: Evolution de la chaleur spécifique de la vapeur d'eau en fonction de la température	55
Figure 21: Profil d'évolution de la température dans le condenseur pour une vapeur à 105°C...56	
Figure 22: températures des fluides chaud et froid à l'entrée et sortie de l'aérocondenseur.	57
Figure 23 : Détermination du coefficient K en fonction de r et R pour les aérocondenseurs.....	61

Figure 24: Evolution de la vitesse d'ascension d'une gouttelette en fonction de son diamètre pour différentes huiles essentielles, en régime laminaire.....	70
Figure 25: Evolution de la vitesse d'ascension d'une gouttelette en fonction de son diamètre pour différentes huiles essentielles, en régime intermédiaire.....	72
Figure 26: Evolution de la vitesse d'ascension d'une gouttelette en fonction de son diamètre pour différentes huiles essentielles, en régime transitoire.....	74
Figure 27: Evolution de la vitesse en fonction du diamètre de gouttelettes et de la viscosité de l'huile essentielle pour différentes densités en régime laminaire.....	77
Figure 28: Evolution de la vitesse en fonction du diamètre de gouttelettes et de la viscosité de l'huile essentielle pour différentes densités en régime intermédiaire.....	78
Figure 29: Prix des réservoirs cylindriques à pression atmosphérique	82
Figure 30: Détermination du prix de base de la virole (pour un récipient sous pression)	84
Figure 31: Détermination du coefficient de coût C en fonction de r et R pour les aérocondenseurs	85

Introduction

Introduction

L'industrie chimique est l'une des industries qui consomme le plus d'énergie. En effet, la plupart des procédés chimiques nécessitent beaucoup d'énergie pour le chauffage, la mise en vapeur, la combustion, la distillation...

La demande énergétique mondiale étant assurée à 79% par des énergies fossiles (Pétrole, Charbon et gaz naturel) non renouvelables et que la combustion de ces dernières est en grande partie à l'origine de l'effet de serre qui menace de bouleverser le climat planétaire avec des conséquences désastreuses. Il apparaît que l'industrie chimique est énergétivore, jusqu'ici dépendante de la durabilité des énergies fossiles et de surcroît polluante. C'est pour cette raison qu'elle est souvent tenue pour responsable des maux environnementaux qui accablent la planète. Ces accusations ne sont pas tout à fait infondées quand on se rappelle qu'elle consomme environ 23 % de la consommation énergétique mondiale, et qu'elle est responsable de 34% des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur industriel.[18].

En raison du renchérissement des énergies fossiles, de leur inéluctable épuisement et de la nécessité impérieuse de préserver la planète du danger du réchauffement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre, il est nécessaire d'envisager de mettre en place des alternatives énergétiques dans le cadre de l'industrie chimique.

La communauté scientifique consciente de ce danger s'est intéressée au développement de procédés intégrant des énergies renouvelables.

Dans ce contexte, de l'utilisation des énergies renouvelables par l'industrie chimique que nous a été proposée cette étude sur « Le potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans une unité d'extraction des huiles essentielles ».

Nous nous fixons comme objectif de concevoir une unité d'extraction d'huiles essentielles qui répondrait aux critères suivants :

- Technologiquement réalisable c'est-à-dire faisant appel à des techniques et matériaux existants et éprouvés ;
- Basée sur les énergies renouvelables ; plus précisément sur l'énergie solaire et la biomasse ;
- Autonome autant que possible sur le plan de son approvisionnement en énergie ;
- Econome en eau, une ressource rare et précieuse pour de nombreux pays parmi lesquels l'Algérie, en concevant l'installation de manière à économiser l'eau ;
- Mobile pour permettre le déplacement vers le lieu de récolte de la matière végétale ;

Cette étude prospective sur l'utilisation des énergies renouvelables devrait permettre d'appréhender la problématique de la transition entre énergies fossiles qui existent et qui sont bien maîtrisés et ces nouvelles sources d'énergie renouvelables pas toujours facile à mettre en œuvre mais qui présentent néanmoins de nombreux avantages.

Partie I

Généralités

- 1- Les huiles essentielles**
- 2- Procédés d'extraction des huiles essentielles**
- 3- Unité classique d'extraction d'huiles essentielles**
- 4- Les énergies renouvelables**

Les huiles essentielles

I. Définition de quelques extraits naturels

Extrait : Élément parfumé isolé parmi plusieurs constituants par distillation, dissolution, expression, enfleurage.

Concrète : Produit solide ou semi solide obtenu après extraction des principes odorants de certaines matières premières végétales par certains solvants volatils, tel que l'éther de pétrole.

Résinoïde : Extrait d'une matière première sèche (végétale ou animale) obtenue par extraction au moyen d'un solvant non aqueux. L'extrait odorant et résineux sert de matière première pour la fabrication de parfum en parfumerie et à la création d'arôme pour l'alimentation.

Absolue : Les essences absolues sont obtenues à partir de concrètes ou de résinoïdes. Pour éliminer les cires, on dilue la concrète dans de l'alcool puis on glace le mélange pour séparer les cires des huiles essentielles. Ces dernières sont ensuite concentrées par distillation sous pression réduite afin d'éliminer l'alcool. Les essences absolues ainsi obtenues sont des matières de grande richesse pour composer les parfums.

Pommade florale : Corps gras parfumé obtenu à partir de fleurs, soit par "enfleurage à froid" (diffusion des composés odorants des fleurs dans le corps gras), soit par "enfleurage à chaud" (digestion ou immersion des fleurs dans le corps gras fondu).

Teinture : Solution obtenue par macération d'une matière première d'origine naturelle dans un éthanol de titre alcoolique variable, suivie d'une filtration.

Essence : est une substance aromatique naturelle que sécrète la plante dans ses organes producteurs. Pour les zestes d'agrumes par exemple, elle est directement extraite par expression. On parle ainsi d'essence de citron et non d'huile essentielle de citron, car elle n'a pas été distillée [8].

II. Définition d'une huile essentielle

L'huile essentielle est un ensemble des molécules aromatiques volatiles d'une plante. Comme son nom ne l'indique pas, les huiles essentielles ne contiennent pas de corps gras comme les huiles végétales obtenues avec des pressoirs (huile de tournesol, de maïs, d'amande douce) [21].

Le terme « huile » s'explique par la propriété que présentent ces composés de se solubiliser dans les graisses et par leur caractère hydrophobe.

Le terme « essentielle » fait référence au parfum, à l'odeur plus ou moins forte dégagée par la plante.

L'huile essentielle est la sécrétion naturelle de la plante. Elle est élaborée par ses organes sécréteurs qui sont localisés dans les différentes parties des plantes et des arbres aromatiques: semence, racine, bois, feuille, fruit et fleur.

Les huiles essentielles sont des messagers chimiques utilisés par les plantes aromatiques pour interagir avec leur environnement. Elles permettent d'éloigner les maladies, les parasites, mais jouent aussi un rôle protecteur face aux rayonnements du soleil. Elles jouent également un rôle important dans la reproduction et la dispersion des espèces végétales puisqu'elles permettent d'attirer les insectes pollinisateurs [22].

III. Utilisations des huiles essentielles

Utilisées depuis des millénaires, les huiles essentielles offrent de nombreux bienfaits thérapeutiques, préventifs, curatifs, hygiéniques et cosmétiques. En effet, les huiles essentielles ont de nombreuses propriétés :

Désodorisantes, parfumantes, antiseptiques :

En diffusion dans l'atmosphère ou diluées dans les produits de nettoyage, les huiles essentielles désinfectent, désodorisent et parfument l'air.

Antibactériennes :

De nombreuses huiles essentielles ont une action antibactérienne, toutefois les plus puissantes sont celles qui contiennent des phénols. Les huiles essentielles d'agrumes sont, par exemple, de remarquables antiseptiques.

Anti-douleurs :

L'huile essentielle de Girofle est utilisée pour calmer les douleurs dentaires. L'huile essentielle de menthe poivrée est efficace pour calmer les problèmes digestifs.

Circulatoires :

L'huile essentielle de cyprès est un stimulant du système circulatoire.

Les huiles essentielles présentent de nombreuses autres propriétés comme celles d'être des agents insecticides, antiviraux, relaxants, anti-stress et tonifiants [29].

IV. Composition des huiles essentielles

La cellule végétale est le siège de la biosynthèse des composés fondamentaux de la matière vivante que sont les protéines, les lipides, les sucres... Elle est capable de coordonner les multiples réactions enzymatiques conduisant à la production d'huiles essentielles.

Certaines cellules prennent en charge ces biosynthèses et également le stockage des métabolites formés. Il s'agit là de tout un ensemble de réactions biochimiques participant à la vie des plantes (respiration, photosynthèse, etc).

Il en résulte que les huiles essentielles constituent des mélanges complexes de composés organiques possédant des structures et des fonctions chimiques très diverses, aboutissement de ces biosynthèses, en particulier celle des isoprénoides (mono terpènes, sesquiterpènes, diterpènes, triterpènes, caroténoïdes).

Il n'est pas rare de reconnaître par les moyens de l'analyse instrumentale moderne (chromatographie gazeuse capillaire, couplage chromatographie gazeuse et spectrométrie de masse) plusieurs dizaines voire une ou deux centaines et parfois plus de constituants dans une huile essentielle : huiles essentielles de vétiver, de patchouli, de géranium. Par exemple, l'huile essentielle de rose bulgare est riche de plus de 300 constituants connus.

Par contre, certaines huiles essentielles sont très riches en un constituant donné. C'est le cas de l'huile essentielle de bois de rose du Brésil riche en linalol mais aussi celui des huiles essentielles de lemongrass et de fruits de *Litsea cubeba* riches en citral.

Mais plus souvent, les huiles essentielles sont plus complexes dans leur composition chimique: outre quelques constituants principaux représentant des proportions comprises entre 10 et 50% (huiles essentielles de citronnelle de Java, de lavande, de camphre, de menthe poivrée...), les autres constituants ne représentent que des traces (de l'ordre du micro ou du nano gramme) [34].

V. Caractéristiques des huiles essentielles

Les huiles essentielles, objets de transactions souvent importantes à valeur monétaire, doivent répondre à des caractéristiques analytiques imposées par les pays producteurs et exportateurs ainsi que par les pays importateurs, et qui ont été établies par des commissions nationales et internationales d'experts [34].

Les caractéristiques des huiles essentielles sont [19] :

V.1. Caractéristiques organoleptiques :

- L'aspect (liquide, limpide) : les huiles essentielles sont généralement liquides à température ambiante.
- La couleur : Les huiles essentielles sont rarement colorées.
- L'odeur.

V.2. Caractéristiques physiques :

- La densité
- L'indice de réfraction à 20°

- Le pouvoir rotatoire à 20°
- La miscibilité à l'éthanol à 80 % à 20°

V.3. Caractéristiques chimiques :

- L'indice d'acide
- La détermination d'ester
- La durée de la saponification
- La détermination d'ester après acétylation

VI. Propriétés physiques des huiles essentielles

- Les huiles essentielles sont généralement liquides à la température ambiante, d'odeur aromatique, colorées ou non.
- Leur densité est le plus souvent inférieure à l'eau de 0.850 à 0.965 sauf pour quelques huiles essentielles telles que les essences de cannelle et de girofle. La plus dense des huiles essentielles est celle de wintergreen de densité égale à 1.187.
- Elles ont un indice de réfraction élevé et, le plus souvent sont douées de pouvoir rotatoire.
- Elles sont volatiles et entraînaibles par la vapeur d'eau.
- Elles sont peu solubles dans l'eau.
- Elles sont solubles dans l'alcool et la plupart des solvants organiques [30].

VII. Propriétés chimiques des huiles essentielles

- Elles s'oxydent facilement à la lumière et se résinifient en absorbant l'oxygène en même temps que leur odeur se modifie, leur point d'ébullition augmente, leur solubilité diminue.
- Elles absorbent le chlore, le brome et l'iode avec dégagement de chaleur.
- Elles peuvent se combiner avec l'eau pour former des hydrates [30].

VIII. Stockage et conservation des huiles essentielles

Presque toutes les huiles essentielles peuvent être stockées pendant plusieurs années, pour autant qu'elles soient pures et naturelles.

Parce que ce sont des substances très concentrées et très sensibles à la lumière, leur conservation se fait dans des flacons teintés qui devront être fermés par un bouchon à vis et entreposées à une température comprise entre 12 et 22 °C. L'endroit idéal pour le stockage des huiles essentielles sera un endroit donc frais et à l'abri de la lumière.

Les huiles essentielles peuvent altérer le plastique, c'est pourquoi elles seront toujours conditionnées dans des flacons en verre [23].

Procédés d'extraction des huiles essentielles

Il existe plusieurs méthodes d'extraction des huiles essentielles. Parmi ces méthodes on peut citer : L'hydrodistillation : la distillation par 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

La distillation a pour objet tout d'abord de faire dégager à l'état de vapeur, la substance odorante incorporée dans la matière végétale, ce qui s'opère dans un alambic, puis de la faire repasser à l'état de liquide pour la récupérer, opération qui se produit dans un réfrigérant.

L'alambic, dans lequel on place la matière végétale dans l'eau bouillante, est surmonté d'un chapiteau qui est fermé, soit hermétiquement, soit grâce à un joint hydraulique placé entre l'alambic et le chapiteau (Figure 1). Ce dernier se continue par un col de cygne, par où se dégagent les vapeurs, qui se prolonge par un serpentin qui plonge dans l'eau du réfrigérant.

Les vapeurs qui arrivent dans le serpentin froid produisent en se condensant une dépression qui entraîne un nouvel appel de vapeurs de l'alambic. L'extrémité du serpentin permet l'écoulement des produits condensés (huile et hydrolat) dans le vase florentin.

Rapidement, les gouttelettes du liquide se forment et montent à la surface de l'eau, leur densité étant inférieure à celle-ci. Il suffit alors de récupérer l'huile en surface, tandis que l'eau qui se trouve en dessous retourne dans l'alambic.

Les avantages de cette méthode sont la simplicité du dispositif et les investissements peu élevés.

Les désavantages sont 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].

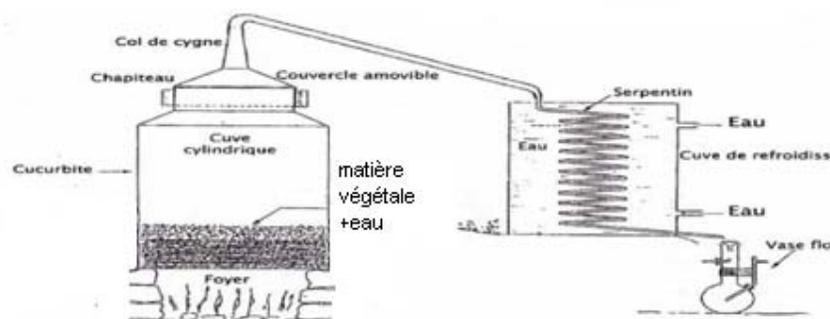


Figure 1: Dispositif d'hydrodistillation [3].

II. Distillation par entraînement à la vapeur d'eau

Cette méthode est proche de l'hydrodistillation à la différence fondamentale près que lorsque les distillations sont réalisées par entraînement à la vapeur, une grille perforée est placée dans le fond de l'alambic. Cela représente l'avantage de ne pas mettre en contact l'eau et la matière végétale et donc d'éviter au maximum que la matière végétale se colle dans le fond de l'alambic, brûlent, et communiquent un goût désagréable au produit distillé.

Ce mode de distillation est basé sur le principe de l'entraînement des composés odorants volatils par des aérosols de vapeur d'eau. Sous l'effet combiné de l'ébullition, il y a un éclatement progressif des cellules et des glandes contenant l'huile essentielle et un épuisement de la matière végétale en différentes fractions d'essence. L'essence n'est ni retenue par le matériel végétal ni solubilisée dans l'eau.

De plus, le parfum de l'huile essentielle obtenue est plus délicat et la distillation plus uniforme, régulière et rapide.

L'entraînement à la vapeur peut aussi être réalisé avec un générateur de vapeur séparé. Les avantages sont un meilleur contrôle de la température, une isolation thermique du système et moins de dégradations de l'huile. Toutefois, ce dispositif est plus complexe et plus coûteux [3].

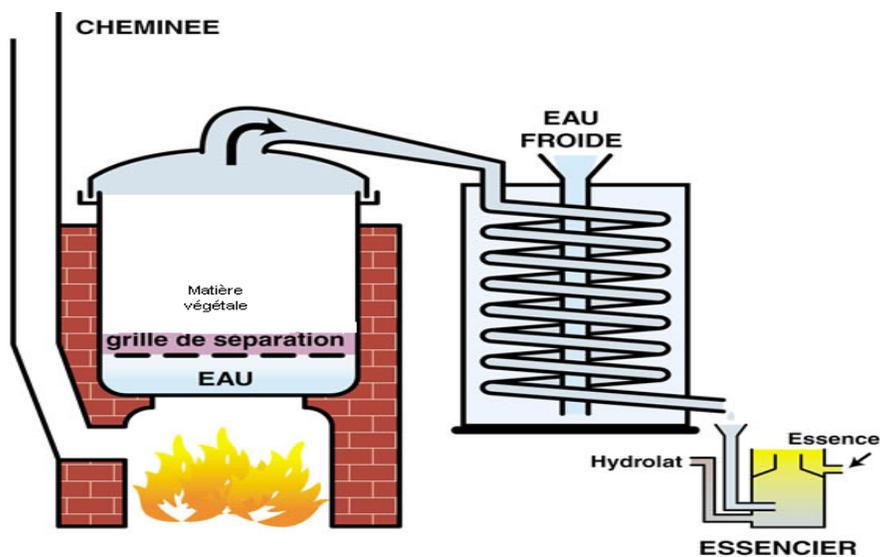


Figure 2: Dispositif de la distillation par entraînement à la vapeur d'eau [22].

La Cohobation (ou cohobage)

Les eaux de distillation sortant du serpentin avec l'huile essentielle entraînant celle-ci de plusieurs manières. Comme nous l'avons vu, la plus grande part de ces huiles n'est pas mélangée, qu'elle soit plus légère ou plus lourde que l'eau. C'est la partie que nous recueillons le plus aisément.

Mais ces eaux entraînent aussi une certaine quantité d'huile essentielle en suspension ou dissoute. Cette part est négligeable dans la plupart des cas.

La part d'huile en suspension dépend surtout de la densité. Des huiles de densité voisine de l'eau donnent un aspect laiteux au mélange sortant du serpentin. Dans ce cas il serait suffisant de laisser reposer le mélange plusieurs heures pour récupérer l'huile de densité proche d'eau, soit à la surface (huile plus légère), soit au fond (huile plus lourde).

Les quantités évacuées ne le permettent pas. Il est indiqué, en ce cas, de placer plusieurs essenciers en cascade à la sortie du serpentin.

Pour les parties solubles, le procédé utilisé est la cohobation.

Il s'agit de renvoyer les eaux sortantes de l'essencier dans la cuve de distillation soit au cours de la distillation, soit après, ou encore dans une nouvelle cuve à distiller. 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 de 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 [2].

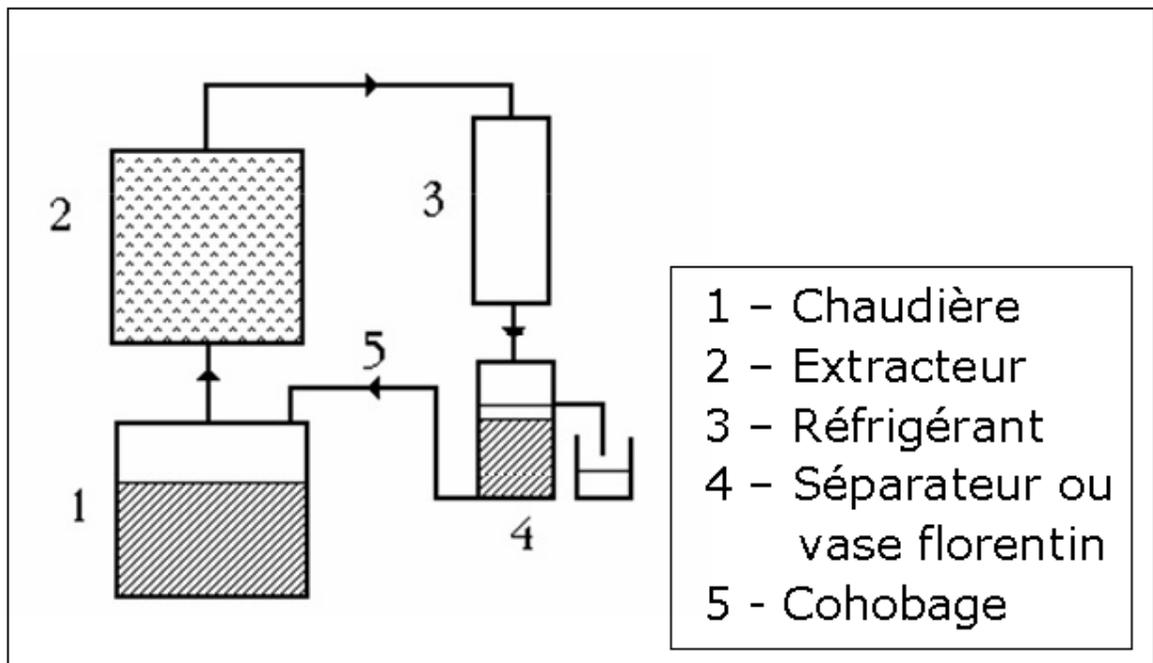


Figure 3: principe de l'entraînement à la vapeur d'eau avec cohobage [2].

La chaudière (1) produit de la vapeur d'eau qui est envoyée dans l'extracteur (2) dans lequel se trouve le produit végétal dont on veut extraire les composés d'arôme. Après condensation dans un réfrigérant (3), la phase aqueuse est séparée de la phase lipidique dans un vase florentin (4). La phase lipidique mise en jeu dans cette méthode est moins dense que la phase aqueuse. On récupère la phase lipidique contenant la majorité des composés d'arôme et qui est appelée huile essentielle. La phase aqueuse est réutilisée en étant réinjectée dans la chaudière, c'est ce que l'on appelle le cohobage (5). On peut également récupérer cette eau résiduelle, comportant une faible proportion de composés d'arôme, qui porte alors le nom d'eau florale.

III. Hydrodiffusion

L'hydrodiffusion est basée sur le même principe que la distillation par entraînement à la vapeur d'eau à la différence que la vapeur est produite et entraînée de haut en bas à travers la matière végétale. L'avantage de cette méthode est que le temps de distillation est raccourci de 30% environ, le rendement est très légèrement supérieur et la composition des produits obtenus est sensiblement différente au plan qualitatif de celle des produits obtenus par la méthode de la distillation par entraînement à la vapeur d'eau [3].

IV. Extraction par solvant

Dans cette méthode, les plantes sont mélangées à un solvant organique dans des récipients de tailles et de formes variables.

Les molécules organiques étant solubles dans les solvants employés, il est particulièrement aisé de séparer les constituants recherchés de leur enveloppe végétale. Le mélange est ensuite filtré pour récupérer le solvant chargé des composés.

L'inconvénient de cette méthode est en fait son principal composant : le solvant. En effet, étant donné les quantités mise en œuvre, les risques de pollution et d'inflammation ne peuvent être réduits à zéro. De plus, les composés à extraire étant emprisonnés dans la cellule par la membrane cellulaire, il faudra donc des solvants capables de la traverser. Enfin, il arrive que des traces de solvant soient présentes dans le produit final [23].



Figure 4: Extracteur par solvant [22].

V. Extraction par expression

Ce procédé est le plus simple de tous, mais il ne peut convenir que pour des écorces fraîches, très riches en essence.

L'expression se fait au moyen de presses hydrauliques, mais on utilise des procédés plus primitifs comme ceux dits à « l'éponge » ou à « l'écuelle », qui donnent un produit de qualité bien supérieure [22].

VI. Extraction par enfleurage

Il consiste, dès la récolte de fleurs fraîches, à les intercaler entre des couches de graisse animale qui retient le parfum. La "pommade" parfumée est lavée à l'alcool qui retient le parfum à son tour. Par exemple pour la rose, la fleur d'oranger, l'acacia, le mimosa, l'enfleurage à froid étant insuffisant, on procède à une immersion dans de la graisse chauffée à 80 ° [22].



Figure 5: Extraction par enfleurage de pétales de rose [22].

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].

Unité classique d'extraction d'huiles essentielles

Ce chapitre traite des différents équipements utilisés pour l'extraction des huiles essentielles par distillation par entraînement à la vapeur d'eau.

I. Chaudière

La chaudière est un système permettant d'augmenter la température d'un fluide en vue de transporter de l'énergie thermique. Ce fluide est qualifié dans ce cas de caloporteur.

Le rôle d'une chaudière dans une unité d'extraction d'huiles essentielles est essentiellement de transmettre de l'énergie thermique (avec ou sans combustion) à de l'eau sous pression pour obtenir soit de l'eau surchauffée sous pression, soit de la vapeur.

De plus, les chaudières à vapeur de grande puissance sont en général associées à une turbine à vapeur pour produire de l'énergie électrique [16].

Classification en fonction de la conception

On distingue les chaudières principalement par leur architecture interne. La distinction la plus nette du point de vue conception est celle qui apparaît entre :

- Les chaudières à tubes de fumées,
- Les chaudières à tubes d'eau.

Chaudières à tubes de fumées

Les gaz résultants de la combustion dans le foyer, circulent ensuite à travers la masse du caloporteur, généralement de l'eau au moyen de tubes, avant d'être évacués par la cheminée

Les chaudières à tubes de fumées dérivent actuellement des premières chaudières à bouilleur et des chaudières semi tubulaires dans lesquelles, en fonction des progrès de technologie de construction, on a cherché à augmenter la surface d'échange initialement limitée aux parois des corps cylindriques léchés extérieurement par les fumées. Cette chaudière présente de nombreux désavantages tels que :

- Des problèmes de maintenance de la pression de service sans déformation excessive.
- L'impossibilité pratique d'un ramonage en marche qui devrait se faire dans le sens de parcours des fumées, donc une fois dans un sens et une fois dans l'autre, selon le passage de fumées considéré et, en particulier, depuis la boîte de fumées où la température est trop élevée.
- Difficulté de l'entartrage du tube de foyer, particulièrement sensible à ce type d'encrassement du fait de transfert de chaleur élevé auquel il est soumis de part des flammes proches de la paroi [12].

Chaudière à tube d'eau

Les chaudières à tube d'eau présentent la grande majorité des chaudières en service. Dans cette construction, c'est le caloporteur qui circule dans les gaz de combustion.

Elles ne subissent pas les contraintes des chaudières à tubes de fumées et permettent de couvrir toute la gamme de vaporisation des chaudières industrielles de 0.1 à 400t/h. Elles permettent une réduction importante du volume d'eau contenu dans les tubes par rapport au débit de vapeur produite, le réservoir ayant la dimension juste nécessaire à la séparation eau vapeur [12].

Chaudières électriques

Les chaudières électriques les plus courantes sont les petites chaudières à thermoplongeur dont la puissance peut aller de quelques dizaines de kilowatts à 8000 kW au maximum. Le réglage se fait par le nombre de résistances alimentées en courant basse tension. Coté vapeur les pressions d'utilisation peuvent atteindre 100 bars, mais se situent en général entre 10 à 15 bar.

Il existe aussi 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.

Enfin, il existe 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 [12].

II. Extracteur ou alambic

Sous sa forme la plus simple, l'alambic consiste simplement en un récipient ou 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 la distillation par entraînement à la vapeur d'eau, on utilise une grille perforée placée dans le fond de l'alambic.

L'alambic, anciennement en cuivre ou en fer, est aujourd'hui généralement en acier inoxydable car le fer est attaqué profondément lors de la distillation des extraits de nombreuses plantes, en particulier les résineux comme le pin, le cyprès, le genévrier [29].



Figure 6 : Alambic classique [22].

III. Condenseur

Le condenseur à eau est largement utilisé dans une unité d'extraction des huiles essentielles par entraînement à la vapeur d'eau pour refroidir les vapeurs d'eau chargée en huile essentielles sortantes de l'extracteur.

Un condenseur est un échangeur de chaleur où se produit un changement de phase d'un des deux fluides en circulation. En effet, l'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.

Il existe de nombreux critères de classement des échangeurs. Voici les plus importants :

Classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

- Echangeurs de chaleur à tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires :

L'un des fluides circule à l'intérieur des tubes et l'autre à l'intérieur de la calandre, autour des tubes. On ajoute en général des chicanes dans la calandre, qui jouent le rôle de promoteurs de turbulence et améliorent le transfert à l'extérieur des tubes. Des boîtes de distribution sont fixées à chaque extrémité du faisceau, ce qui assure la circulation du fluide à l'intérieur du faisceau en une ou plusieurs passes. La calandre est elle aussi munie de tubulures d'entrée et de sortie pour le second fluide (qui circule à l'extérieur des tubes) suivant le chemin imposé par les chicanes.

- Echangeurs de chaleur à plaques [34].

Classement fonctionnel

Le passage des fluides dans l'échangeur peut s'effectuer avec ou sans changement de phase ; suivant le cas, on dit que l'on a un écoulement monophasique ou diphasique. On rencontre alors les cas suivants :

- Les deux fluides ont un écoulement monophasique ;
- Un seul fluide a un écoulement avec changement de phase, cas des évaporateurs ou des condenseurs ;
- Les deux fluides ont un écoulement avec changement de phase, cas des évapocondenseurs [34].

Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange

On retiendra deux types de paroi :

- Les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux : superalliages, métaux ou alliages réfractaires ;
- Les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc [34].

IV. Décanteur (essencier ou vase florentin)

La séparation des deux produits finis de la distillation (huile essentielle et hydrolat) se fait avec ce que nous appelons un vase florentin (décanteur). Le principe est basé sur le fait suivant: les huiles essentielles ne se mélangent pas dans l'eau, ils y flottent ou alors se déposent sur le fond.

Le vase florentin permet de séparer eau et huile essentielle.

Deux types de vases florentins sont présentés par la figure 7. A gauche un système pour séparer les huiles plus légères que l'eau et à droite un système pour séparer les huiles plus lourdes que l'eau (cannelle, clous de girofle) [9].

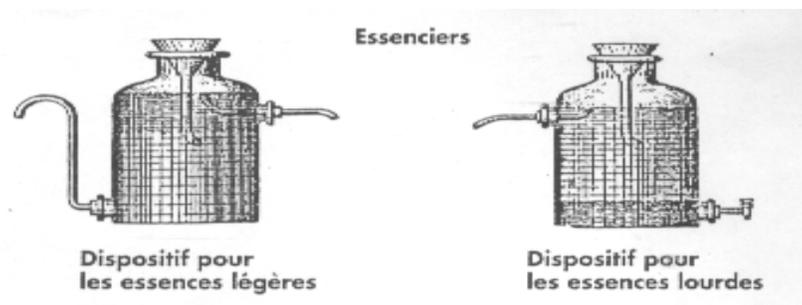


Figure 7: Essencier pour séparation des huiles légères et des huiles lourdes [9].

IV.1. Principe du vase florentin

Le principe du vase florentin repose sur la différence de densité entre l'eau et les huiles essentielles. Parfois, un jeu de cloisons ménagés à l'intérieur du vase sépare l'huile en très petite quantité, qui surnage par rapport à l'hydrolat [9].

Les hydrolats

Le nom hydrolat vient du latin "hydro" (= eau) et du vieux français "lat." (= lait), du fait de son apparence légèrement trouble dans les quelques minutes qui suivent la distillation.

Le terme "eau florale" concerne exclusivement les hydrolats de fleurs. La concentration en principes actifs de l'hydrolat est inférieure à celle de l'huile essentielle, généralement de moins de 2 à 3% [23].

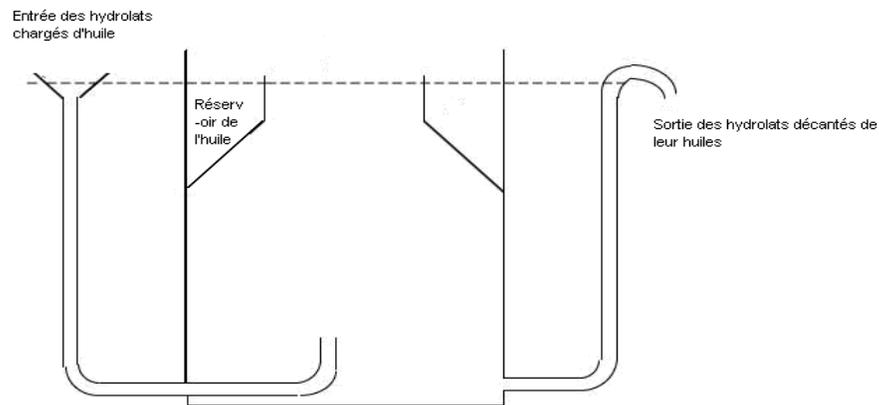


Figure 8: Principe de fonctionnement du vase florentin.

IV.2. Matériau utilisé pour l'essencier

L'essencier peut être en fer galvanisé, en aluminium, en cuivre, en cuivre étamé ou en acier inoxydable.

Pour les huiles essentielles de densité très voisine de l'eau, on est amené à laisser le mélange plusieurs heures dans l'essencier pour obtenir une séparation complète par différence de densité. En ce cas, si l'essencier est en cuivre ou en laiton, l'huile essentielle se colore en vert par dissolution d'oxyde de cuivre. Un essencier en inox est donc préférable.

Un essencier en verre conviendrait aussi pour la pureté du produit, mais ceux-ci sont fragiles et assez difficiles à construire. Ils ne sont généralement utilisés que dans les laboratoires d'essais et de recherches [31].

IV.3. Phénomènes physiques dans un essencier

IV.3.1. La décantation

La décantation est une opération de séparation mécanique, par différence de gravité de phases non miscibles dont l'une au moins est liquide.

On peut séparer des phases liquides (c'est le cas pour les huiles essentielles dans l'essencier) ou une phase solide en suspension dans une phase liquide. Les facteurs qui influent sur la vitesse de décantation sont:

- La différence de densité des liquides,
- la viscosité du liquide dispersif,
- l'accélération de la pesanteur,
- le diamètre des petites gouttelettes [1].

IV.3.2. La coalescence

La coalescence est un phénomène par lequel deux substances identiques, mais dispersées, ont tendance à se réunir. On peut citer à titre d'exemple les gouttes de mercure qui lorsqu'elles viennent à se toucher se rassemblent subitement pour ne faire qu'une seule goutte.

Dans l'essencier, on observe que 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. Le phénomène principal mis en jeu est que le matériau optimise sa surface, de manière à atteindre un minimum d'énergie. En un mot, la coalescence est la fusion d'agrégats dispersés en gouttelettes de plus grande taille [22].

Les sources d'énergie renouvelables

Il existe de nombreuses sources d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la Géothermie. Les sources d'énergie que nous avons retenus pour la réalisation de notre unité sont la biomasse et l'énergie solaire.

Notre choix c'est vite porté sur ces deux sources d'énergie pour les raisons suivantes :

- Après l'extraction de l'huile essentielle, on dispose d'une matière végétale pouvant être récupérée et utilisée comme source d'énergie « la biomasse ».
- Le potentiel solaire algérien étant considérable, l'énergie solaire s'imposait d'elle-même comme alternative pour la production de vapeur d'eau au niveau de l'unité projetée

I. Biomasse

I.1. Définition de la biomasse

La biomasse est l'ensemble de la matière végétale. C'est une véritable réserve d'énergie, captée à partir du soleil grâce à la photosynthèse.

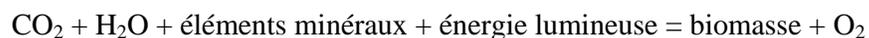
La biomasse englobe diverses matières premières organiques d'origine végétale : produits sylvicoles, recyclage de déchets agricoles, industriels ou ménagers. Elle constitue la quatrième ressource exploitée à l'échelle mondiale (14% de la consommation d'énergie mondiale).

On peut produire de l'énergie à partir de biomasse par combustion dans une chaudière, par bioconversion de celle-ci en biogaz ou encore en biocarburants [24].

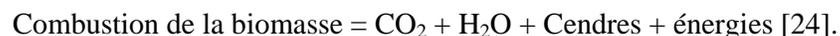
I.2. Combustion directe de la biomasse

Pour que la combustion soit possible, il faut réunir en même temps une matière combustible, un corps comburant (oxygène) qui, se combinant, entrent en combustion et libèrent de l'énergie thermique.

La production photosynthétique est décrite sommairement par l'équation suivante :



Les utilisations de la biomasse comme combustible s'inscrivent dans le cycle naturel du carbone :



I.3. Biogaz

Le biogaz désigne du méthane issu de la décomposition des déchets organiques par des bactéries dites méthanigènes. Cette fermentation affecte tous les matériaux organiques: déchets de l'agriculture (fumiers, résidus végétaux), de l'agro-industrie, déchets ménagers. Elle se produit spontanément dans la nature (marais, tas de compost...) ou dans les décharges contenant suffisamment de déchets organiques.

Lorsqu'elle est menée dans un digesteur, la décomposition de la biomasse produit à la fois du biogaz et un résidu plus ou moins sec qui peut servir d'engrais.

Ce biogaz peut faire fonctionner une turbine à vapeur, qui donnera de l'électricité et de la chaleur, ou servir de carburant pour les voitures à gaz [20].

I.4. Biocarburants

Un biocarburant ou agrocaburant est un carburant produit à partir de matériaux organiques renouvelables et non fossiles.

Cette production peut se faire selon deux procédés distincts:

La production de bioéthanol par fermentation alcoolique de biomasse fermentescible (canne à sucre, betterave sucrière), d'amidon hydrolysé ou encore de sucres.

La production de biofioul ou biodiesel par transformation chimique (estérification) de biomasse oléagineuse (colza, tournesol)

Le biodiesel peut être utilisé pur ou en mélange.

Le bioéthanol et le biodiesel sont principalement utilisés en mélange avec de l'essence ou du fioul. Les pays disposant de grandes quantités de biomasse bon marché, comme le Brésil avec la canne à sucre où les Etats-Unis avec l'amidon de maïs utilisent depuis longtemps et massivement le bioéthanol [20].

I.5. Production d'électricité à partir de la biomasse

La biomasse permet de produire de l'électricité par :

Combustion directe de la biomasse : dans des centrales thermiques équipées pour utiliser la biomasse comme combustible ou des systèmes de cogénération combinant production de chaleur et d'électricité.

Combustion après traitement : la biomasse est alors généralement traitée (concassage, compression, gazéification et transformation en biogaz) afin d'améliorer l'efficacité énergétique de sa combustion [24].

I.6. Caractéristiques physiques et chimique de la biomasse

I.6.1. Humidité

L'humidité est un facteur déterminant dans l'utilisation de la matière végétale comme combustible. Elle influe sur la conservation de la matière, sur sa masse volumique et sur son contenu énergétique [34].

I.6.2. Granulométrie

La granulométrie offre une indication sur la taille des morceaux de matière végétale constituant l'assortiment de combustibles, elle permet de sélectionner les technologies optimales d'alimentation et de combustion.

La granulométrie est caractérisée par trois grandeurs :

- les cotes moyennes des morceaux de la fraction la plus importante ;
- le pourcentage de fines (poussières) ;
- le pourcentage et la longueur maximale de gros morceaux [34].

I.6.3. Masse volumique

Il convient de différencier la masse volumique réelle du bois de sa masse volumique apparente.

La masse volumique réelle est la masse volumique du végétal en tant que tel, elle dépend de l'humidité.

La masse volumique apparente tient compte de la granulométrie et de l'empilage du combustible végétal. Dans un mètre cube apparent, les vides sont alors remplis par de l'air, abaissant alors la valeur de la masse volumique [34].

1.6.4. Teneur en cendres

Théoriquement, les cendres présentes dans les foyers après la combustion sont dues aux matières minérales contenues dans le combustible, leur teneur variant de 0,5 à 8 % selon les cas. Il convient de distinguer les matières minérales internes, qui font partie intégrante du combustible (moins de 1 % pour le bois), et les matières minérales externes qui proviennent de la terre et du sable qui ont été ajoutés lors de la récolte, de la manipulation et du stockage du combustible (jusqu'à 7 % dans le cas de certains lots d'écorces).

De ce fait, le taux de cendres et leur composition moyenne dépendent plus du lieu de production et des procédés de collecte et de stockage que du produit lui-même.

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 poser des problèmes de fusibilité, entraînant des phénomènes de corrosion [34].

I.6.5. Composition chimique de la biomasse

- La composition chimique de la matière organique des différentes biomasses est remarquablement constante, quelle que soit l'origine et l'espèce du produit. Elle se compose de polymères (cellulose, hémicellulose, lignine, etc.), de résines et de tanins. La composition moyenne donnée ci-dessous [34] est généralement retenue pour la fraction organique anhydre des produits de type biomasse :
 - Carbone 49,0 %
 - Hydrogène 5,5 %
 - Oxygène 45,3 %
 - Azote 0,2 %.

I.7. Chaudière biomasse

Les générateurs ou chaudières transforment et transmettent l'énergie contenue dans la biomasse à un fluide. Ils sont composés de deux éléments : d'un foyer (ou se déroule la combustion) et d'un échangeur (où se produit le transfert de la chaleur vers le fluide) [12].

I.7.1. Foyer

Il existe plusieurs types de foyers pour la biomasse selon le combustible utilisée, foyer à insufflation, le foyer à grille plane, le foyer à grille mobile, le foyer volcan avec grille rotative et foyer à lit fluidisé stationnaire [12].

I.7.2. Échangeur de chaleur

L'échangeur de chaleur permet le transfert de la chaleur au fluide. Les chaudières biomasse sont principalement équipées de deux types d'échangeurs : les échangeurs à tubes d'eau et les échangeurs à tube de fumées.

Pour les échangeurs à tubes de fumées, les gaz de combustion circulent dans des tubes placés dans l'eau de la chaudière. Les échangeurs à tubes de fumées actuels sont généralement à deux ou trois passages de fumées. Ils sont majoritairement positionnés à l'horizontale, mais il existe des modèles verticaux. Le premier parcours est constitué par la chambre de post-combustion, le deuxième et le troisième correspondent aux faisceaux tubulaires. Pour favoriser les échanges thermiques, le temps de séjour des gaz à l'intérieur des faisceaux tubulaires doit être élevé. Les chaudières à tubes de fumées répondent à des besoins de production d'eau chaude classique, voire d'eau surchauffée, et sont généralement utilisés pour les chaudières de petites et de moyennes tailles (jusqu'à 30 MW).

Pour les échangeurs à tubes ou lames d'eau, contrairement aux échangeurs à tubes de fumées, les gaz de la combustion transmettent la chaleur à l'eau qui circule à l'intérieur des tubes de l'échangeur. Il existe plusieurs types de chaudières à tubes de fumées : les chaudières à circulation naturelle, à circulation forcée et les générateurs de vapeur. Les chaudières à tubes d'eau représentent la majorité des chaudières vapeur en service actuellement et sont généralement utilisées pour les chaudières de moyennes et grandes tailles (de 10 à 900 MW) [12].

II. Énergie solaire

II.1. Généralités sur le rayonnement solaire

Le soleil produit grâce à la fusion de l'hydrogène en hélium une quantité d'énergie colossale. Une partie de cette énergie est mobilisée pour maintenir la température interne du soleil et l'autre rayonnée dans l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques.

Avec une espérance de vie de plusieurs milliards d'années, le soleil est clairement la source d'énergie la plus durable que l'on puisse imaginer aujourd'hui.

Une partie infime de l'énergie rayonnée par le soleil arrive sur terre (1,4Kw par m² avant l'entrée dans l'atmosphère). Cependant, cette quantité est considérable à notre échelle car elle représente 10.000 fois la quantité d'énergie que consomme aujourd'hui l'humanité.

Malheureusement, l'énergie solaire n'est pas directement exploitable par l'homme. C'est pourquoi il existe des processus de conversion comme les panneaux solaires photovoltaïques et les panneaux solaires thermiques qui permettent de convertir l'énergie lumineuse du soleil [20].

II.2. Panneaux solaires ou capteurs solaires

Les panneaux solaires sont des appareils transformant l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique. On peut ensuite utiliser cette chaleur comme celle de toutes les sources usuelles de chaleur, c'est-à-dire pour chauffer les locaux industriels ou les logements, fournir l'eau chaude sanitaire, activer la croissance des végétaux, sécher les grains et les fourrages, faire fonctionner des moteurs thermique produisant de l'énergie mécanique ou de l'électricité [20].

II.3. Types de panneaux solaires

On distingue essentiellement deux types de panneaux solaires :

Les panneaux solaires thermiques : appelés capteurs solaires thermiques, qui convertissent la lumière en chaleur. Le principe de ces panneaux consiste à chauffer un liquide ou un gaz pour en utiliser ultérieurement l'énergie (eau sanitaire, séchage des récoltes,...) ;

Les panneaux solaires photovoltaïques: appelés modules photovoltaïques, qui convertissent la lumière en électricité. Ces panneaux utilisent la capacité des semi-conducteurs à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique. Si cette transformation ne se fait pas sans perte (le rendement du photovoltaïque est environ trois fois moindre que celui du thermique), elle permet des applications beaucoup plus larges (transport, alimentation d'appareils électriques,...) [20].

II.3.1. Panneaux solaires photovoltaïques

II.3.1.1. Historique et mode de fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques

Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, le phénomène de transformation de la lumière du soleil en électricité s'appelle l'effet photoélectrique. Albert Einstein a finalement expliqué le phénomène, ce qui lui a valu la notoriété et le prix Nobel en 1922.

En résumé le processus fonctionne de la manière suivante:

- Les rayons lumineux du soleil mettent en mouvement des électrons dans des matériaux semi-conducteurs (cellules solaires photovoltaïques) et le déplacement de ces porteurs de charge crée un courant continu.
- 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.
- 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. On peut alors utiliser le courant alternatif produit, mais en pratique on l'injecte dans le réseau, qui joue le rôle de 'stockage' de l'électricité [33].

II.3.1.2. Technologie des panneaux solaires photovoltaïques

L'essentiel des cellules photovoltaïques vendues sur le marché aujourd'hui est constitué de cellules à base de silicium.

Le silicium (*silicon* en anglais) est un 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.

Après le raffinage, on obtient des lingots de silicium ronds ou carrés (mono ou polycristallin) qui sont ensuite découpés en tranches très fines (wafers), qui constituent après un traitement physico-chimique, la cellule photovoltaïque.

Un panneau solaire est constitué de cellules solaires photovoltaïques assemblées en série et généralement encapsulées par laminage thermique entre deux plaques de verre, à l'arrière de laquelle de simples câbles connecteurs sortent [33].

II.3.1.3. Rendement des panneaux solaires photovoltaïques

La puissance nominale ou crête d'un panneau solaire exprimée en watt indique la puissance maximum fournie par un panneau solaire lorsque l'irradiation solaire est maximum.

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 représente donc le pourcentage d'énergie lumineuse converti en énergie électrique. Cela signifie que 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 laboratoire ou pour les satellites, on obtient des rendements jusqu'à 30 voir 40 %, mais les cellules permettant d'atteindre ces rendements coûtent très chers.

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 watts par m² de panneau solaire [33].

II.3.1.4. Installation photovoltaïque

La puissance totale d'une installation solaire est obtenue en additionnant la puissance nominale de chaque panneau solaire. 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.

Ce nombre d'heures d'irradiation solaire annuel varie sur la terre en fonction du climat d'un lieu géographique donné, de l'orientation de ce lieu par rapport au Sud, de l'ombre des montagnes, des nuages ou des arbres, ainsi que par d'autres facteurs.

Il existe dans chaque pays des données généralement fournies par les services météorologiques, par la NASA ou autres instituts spécialisés qui indiquent précisément pour un lieu donné l'irradiation mensuelle ou annuelle totales, Ces données sont des indicateurs fiables qui permettent de calculer précisément les productions mensuelles ou annuelle d'une installation solaire [33].

II.3.2. Panneaux solaires thermiques (chauffe-eau solaires)

II.3.2.1. Fonctionnement du chauffe eau solaire

L'eau, dans une bassine, laissée en plein soleil chauffe, mais cette eau au passage d'un nuage ou quand le soleil est très bas, refroidi très vite. L'intérêt du chauffe eau solaire est de canaliser les rayons du soleil tout en conservant la température de l'eau le plus longtemps possible après le coucher du soleil. Ceci est assuré grâce à l'utilisation d'un effet de serre et à l'isolation thermique à l'intérieur du chauffe eau solaire.

L'effet de serre est assuré grâce à une couverture en matériau transparent placée au dessus du capteur, les rayons du soleil changent de fréquence en touchant le corps noir du capteur et se retrouvent bloqués à l'intérieur du coffre. L'eau va pouvoir monter en température et la conserver plus durablement.

En effet, le rayonnement solaire est absorbé par une plaque noire, laquelle transmet sa chaleur à un fluide caloporteur composé d'eau éventuellement additionnée d'antigel. Ce fluide passe dans un échangeur thermique (serpentin) dans le ballon d'eau sanitaire à laquelle il cède sa chaleur, avant de retourner au capteur [35].

II.3.2.2. Production de chaleur par un capteur solaire thermique

La production de chaleur d'un capteur se mesure en kWh, comme l'électricité. Au Nord de l'Algérie, 1 m² de capteur incliné à 45° et orienté plein sud produira environ 500 kWh de chaleur par an.

On utilise la notion de taux de couverture pour mesurer la contribution, en pourcentage, de la production d'eau chaude sanitaire par une installation solaire (le reste étant fourni par l'appoint). Ainsi une installation solaire produisant 1500 kWh/an alors que les besoins sont de 2000 kWh/an a un taux de couverture annuel de 75%.

La productivité d'une installation est la production de chaleur (en kWh) par m² de capteur, sur une période de temps donnée. Elle peut aller de 20 kWh/m² pour le mois de décembre, jusqu'à 60 kWh/m² en juin [25].

II.3.2.3. Implantation des panneaux solaires thermiques

Les capteurs sont intégrés de préférence dans le toit du bâtiment s'il est en pente, mais ils peuvent aussi être posés au sol, sur une terrasse d'immeuble.

L'inclinaison des panneaux solaires : en général, l'inclinaison est de 45° pour capter le maximum d'énergie sur l'année. Cette inclinaison peut varier entre 30° et 60°.

L'orientation des panneaux solaires: il est préférable de tourner les capteurs plein sud. Toutefois, selon certaines contraintes comme l'évitement d'un masque ou la position du bâtiment, une déviation par rapport au Sud inférieur à 30° peut être acceptée sans perte importante de productivité. Les capteurs peuvent être fixés sur un toit, une terrasse, par terre à côté de la maison ou sur une façade, et inclinés à environ 45° afin de recevoir le rayonnement solaire au mieux [35].

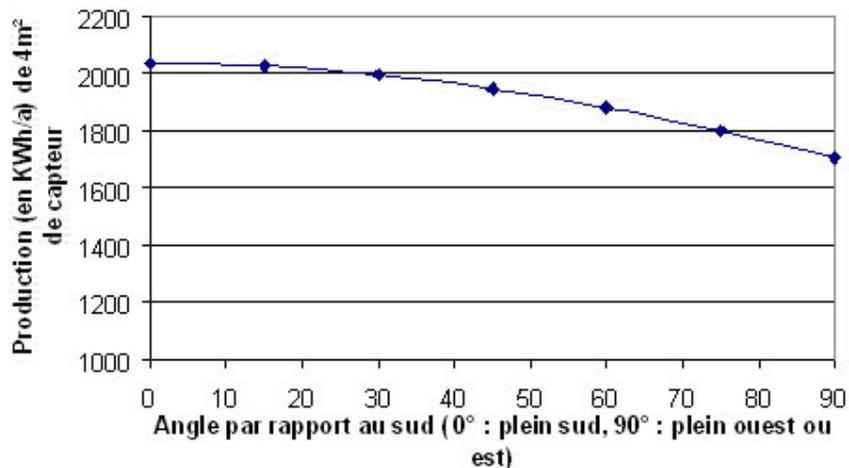


Figure 9: Influence de l'orientation des panneaux solaires sur la production énergétique [35].

II.3.2.4. Technologie du chauffe eau solaire

Le chauffe-eau solaire est composé de 2 éléments principaux :

- Des capteurs thermiques qui reçoivent le rayonnement solaire ;
- Un ballon de stockage de l'eau chaude ;

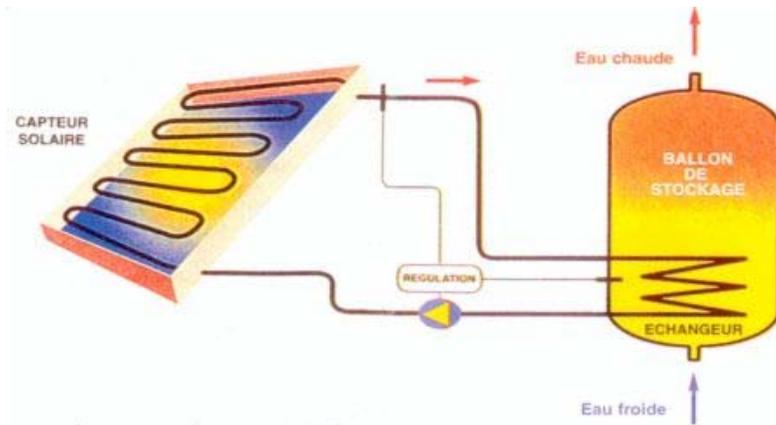


Figure 10: Eléments du chauffe eau solaire [28].

Un capteur solaire est composé des éléments suivants:

- 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, subsidiairement un coffrage étanche à l'eau et un système de support mécanique de l'ensemble.

Il existe plusieurs types de chauffe-eau solaires. Ainsi on distingue :

- le chauffe-eau solaire "monobloc"
- le chauffe-eau solaire à "thermosiphon" à éléments séparés
- le chauffe-eau solaire à éléments séparés avec pompe et régulation [28].

Le chauffe-eau solaire "monobloc"

Ce chauffe eau relie les capteurs et le ballon dans un seul composant. Son fonctionnement est autonome et son installation très simple. En effet, il suffit de brancher l'alimentation de l'eau froide et connecter le départ de l'eau chaude à un robinet.

L'inconvénient de ce type d'installation réside dans le fait que le ballon d'eau chaude est placé à l'extérieur occasionnant ainsi des problèmes de déperdition thermique et d'intégration architecturale [28].

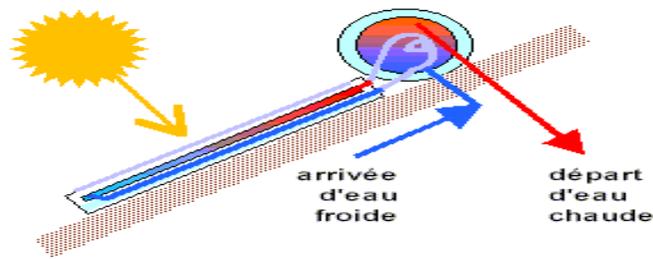


Figure 11: Chauffe-eau solaire « monobloc » [28].

Le chauffe-eau solaire à "thermosiphon" à éléments séparés

Dans les chauffe-eau solaires à Thermosiphon, la circulation de l'eau chaude entre le capteur et le ballon est assurée naturellement grâce à la différence de température entre les deux compartiments. Pour ce faire, le ballon doit impérativement être placé plus haut que les capteurs et les circuits hydrauliques doivent être installés dans les règles de l'art afin de faciliter la thermo circulation.

Le fonctionnement de ce type de chauffe-eau solaire est très simple et les risques de pannes sont réduits en raison de l'absence d'un système de propulsion de l'eau. Les coûts sont restreints et les performances, surtout dans les régions ensoleillées comme en Algérie, sont excellentes [28].

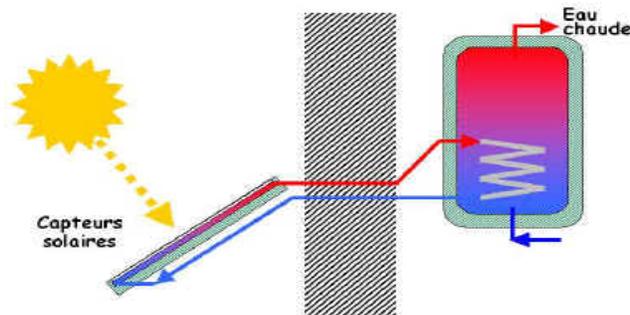


Figure 12: Chauffe-eau solaire à "thermosiphon" à éléments séparés [28].

Le chauffe-eau solaire à éléments séparés avec pompe et régulation

Cette type de chauffe-eau solaire dit à « circulation forcée ». permet d'envisager des installations où seul le capteur est à l'extérieur, le ballon pouvant être placé à l'intérieur comme par exemple dans une cave. Pour ce faire, le dispositif fait appel à une pompe ainsi qu'un système de régulation électronique pour mettre en marche et arrêter celle-ci aux moments opportuns. Il permet de réduire les déperditions de chaleur tout en étant plus facile à intégrer sur le plan architectural [28].

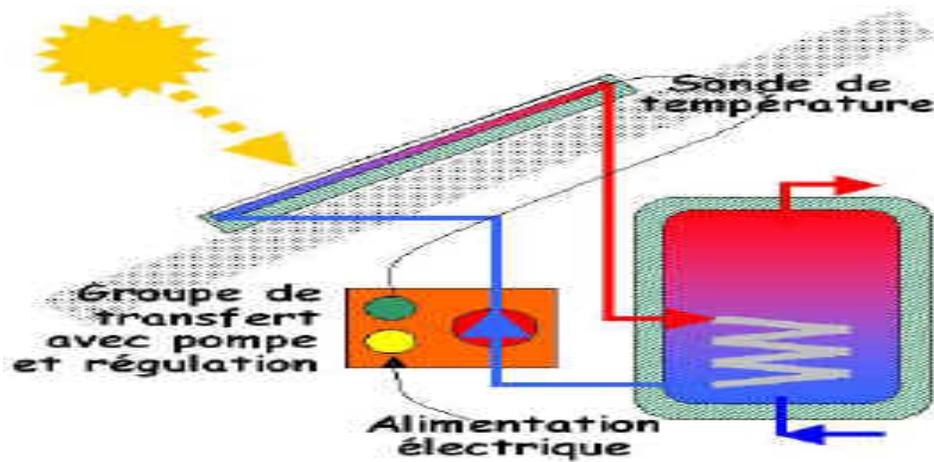


Figure 13: Chauffe-eau solaire à éléments séparés avec pompe et régulation [28].

II.4. Le potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (Hauts-Plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au Sud du pays [27].

Tableau I: Potentiel solaire en Algérie pour différentes régions [32]

Paramètres	Régions		
	Régions côtières	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/an/m ²)	1700	1900	2650

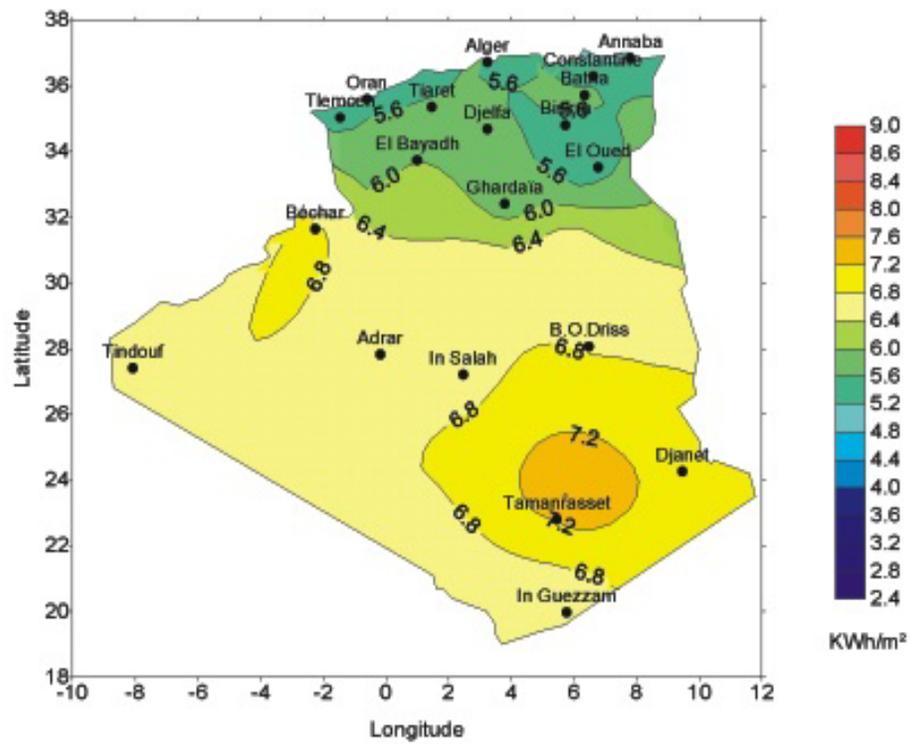


Figure 14: Irradiation solaire annuelle moyenne reçue sur plan incliné sur le territoire algérien [25].

Partie II

Audit énergétique et solutions écologiques

- 1- Potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans l'unité d'extraction mobile**
- 2- Dimensionnement de l'aérocondenseur**
- 3- Dimensionnement du décanteur**

Préambule

Cette conception doit considérer la quantité d'énergie consommée à l'occasion de mise en œuvre des procédés d'extraction par entraînement à la vapeur d'eau d'huiles essentielles énergétiques. Il s'agira de minimiser ce paramètre en tenant compte des contraintes imposées par le procédé.

De plus une opération du procédé consiste en la condensation des vapeurs chargées d'huile essentielle dans un échangeur double tube utilisant l'eau comme fluide froid. Il est préconisé de tester le potentiel de refroidissement et de condensation des vapeurs par aéroréfrigération et ce dont le but de réduire au maximum la consommation en eau.

Pour éviter la perte de la quantité d'huile essentielle en suspension dans l'hydrolat, nous avons recourus au procédé de cohobation qui consiste à réinjecter l'hydrolat dans la chaudière. Cette configuration permet :

- d'augmenter le rendement d'extraction
- de réduire la consommation d'eau par l'installation
- d'éviter le rejet dans la nature d'une eau contenant des quantités d'huile essentielle dont certains constituants peuvent se révéler toxiques par effet de concentration s'ils sont faiblement biodégradables

Notre objectif est l'évaluation de la quantité de chaleur dégagée par incinération des résidus de la matière végétale après extraction des huiles essentielles et ce dans une double optique. D'une part déterminer quel est le potentiel énergétique de ces résidus et dans quelle proportion ce potentiel pourrait être intégré dans le bilan énergétique de l'installation et d'autre part, de réduire les rejets de ces résidus (rejets solides).

Il n'est pas exclu d'envisager, par ailleurs, le fait que le procédé puisse puiser une partie de sa consommation énergétique d'une source renouvelable telle que l'énergie solaire. Comme les campagnes de cueillettes et d'extraction ont généralement lieu au printemps et en été, c'est-à-dire aux périodes de fort ensoleillement, il était intéressant que l'unité mobile d'extraction soit dotée de panneaux solaires comme appoint énergétique.

Les résultats escomptés permettront d'établir les bilans de matière et de dimensionner les différents équipements.

L'accent sera mis dans cette partie sur le calcul du taux d'autonomie en énergie par consommation de ses propres rejets en matières solides et par production d'énergie à partir des panneaux solaires.

En matière de conception, l'idée est de favoriser des modules d'extraction, de taille relativement petite, embarqués sur benne tractable. Cette option a retenu notre attention à double titre. En effet, par le biais de cette solution, les frais de transport et de stockage de la matière végétale ainsi que la dégradation du substrat végétal après cueillette peuvent être réduits au maximum, lors des manipulations. Du moment qu'il est préconisé pour ce type d'installation de mener les extractions en plein champ. De plus sa mobilité permettra l'orientation des panneaux en fonction de l'ensoleillement.

NOMENCALTURE

Constantes :

Nom	description	Unité	Valeur
ΔH_{vap}	Chaleur de vaporisation de l'eau	kJ/kg	2501
Cp_{e-vap}	Chaleur massique de la vapeur d'eau	$J/kg^{\circ}C$	1830
Cp_{e-liq}	Chaleur massique de l'eau	$J/kg^{\circ}C$	4186
Cp_{air}	Chaleur massique de l'air sec	$J/kg^{\circ}C$	1006

Paramètres :

Nom	description	Unité
Sc	Surface de capteurs	m^2
Su	Surface utile du capteur	m^2
SHT	Surface maximum de la projection du capteur complet, isolant latéral compris	m^2
LH	Longueur max isolant latéral compris	m
IH	Largeur max isolant latéral compris	m
Lu	Longueur utile du capteur	m
lu	Largeur utile du capteur	m
B	Rendement optique du capteur	-
K	Coefficient de pertes	$W / ^{\circ}Cm^2$
V_{stock}	Volume du ballon de stockage	L
Bj	Besoin énergétique moyen journalier	kWh/j
Ba	besoin énergétique moyen annuel	kWh/an
We	Débit volumique d'eau	L/j
Ej	Production solaire moyenne journalière	kWh/j
E1j	productivité moyenne journalière	kWh/ m^2j
Ij	irradiation solaire moyenne journalière	kWh/ m^2j
R	Rendement moyen du système	-
T_0	Température de l'eau à la sortie	$^{\circ}C$
T_1	Température de vaporisation de l'eau	$^{\circ}C$
T_2	Température de l'eau à l'entrée	$^{\circ}C$
t_1	Température de l'air à l'entrée	$^{\circ}C$
t_2	Température de l'air à la sortie	$^{\circ}C$
Me	Débit volumique de l'eau	$l/jour$
Q_1	Energie échangée pour la désurchauffe	$kcal/h$
Q_2	Energie échangée pour la condensation	$kcal/h$
Q_3	Energie échangée pour le refroidissement	$kcal/h$
Q_{total}	Energie totale échangée	$kcal/h$

Potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans l'unité d'extraction mobile

I. Description de l'installation

Ce que l'on propose pour l'installation des différents équipements nécessaires à l'extraction des huiles essentielles, c'est d'intégrer ces différents éléments dans un **Mobilab**.

L'installation que l'on propose comporte :

- Le Mobilab ;
- Un brûleur biomasse ;
- Une installation solaire ;
- Un extracteur ;
- Un aérocondenseur ;
- Un décanteur.

L'installation se compose d'une partie fixe et d'une extension fonctionnant comme un tiroir monté sur des glissières en forme de rails.

Le montage est stabilisé grâce à des vérins montés aux quatre angles du MOBILAB.

L'accès aux différents panneaux sur la toiture ce fait par une échelle mobile.

Le choix s'est porté sur ce système puisque il possède plusieurs avantages :

- Etant moins long, il permet de circuler sur nos routes qui sont généralement étroite à l'intérieur des terres.
- Il est plus facile à conduire dans les virages.
- Il offre un confort de travail optimum, il a plus d'espace pour le matériel et l'entreposage des matières premières, cette largeur de près de 4 m que l'on ne peut obtenir avec un laboratoire mobile classique.
- Le toit du MOBILAB est équipé de panneaux solaires pouvant être inclinés selon trois positions prédéfinies grâce à des charnières permettant une inclinaison optimale suivant les saisons de 30, 45 ou 60°.
- La partie extensive nous permet aussi de gagner sur la surface du toit qui est utilisée comme support de capteurs thermiques.
- Le MOBILAB est équipé de deux extincteurs anti-incendie de type ABC pour les premiers secours, deux issues qui peuvent être de secours sur une première paroi ainsi qu'une fenêtre s'ouvrant à l'extérieur sur la paroi opposée.
- Des amenées d'air sont prévues au niveau bas des parois équipées de grilles et au niveau des plafonds des sorties d'air.
- Une cheminée est prévue pour l'évacuation des gaz brûlés.

II. Le Mobilab (Figures 14A, 14B, 14C et 14D)

FICHE TECHNIQUE

Les dimensions du Mobilab en déplacement sont données dans le tableau suivant :

Tableau II: Dimensions du Mobilab en déplacement.

Longueur (m)	9.00
Largeur (m)	2.30
Hauteur cabine (m)	2.50
Surface exploitable (m ²)	22

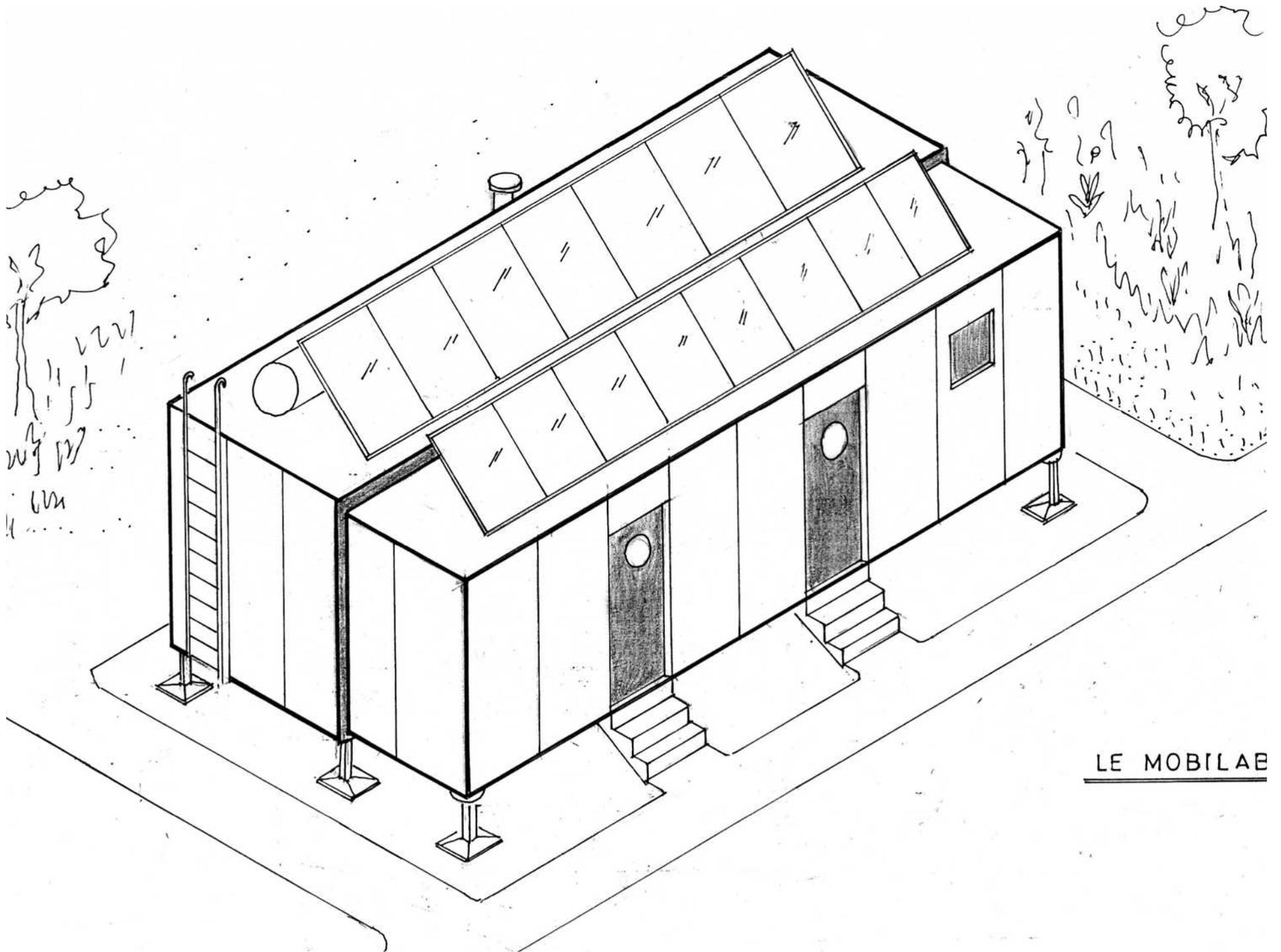
Les dimensions du Mobilab en exploitation sont données dans le tableau suivant :

Tableau III: Dimensions du Mobilab en exploitation.

Longueur (m)	9.00
Largeur (m)	3.90
Hauteur cabine (m)	2.40
Surface exploitable (m ²)	34

La structure présente les caractéristiques suivantes :

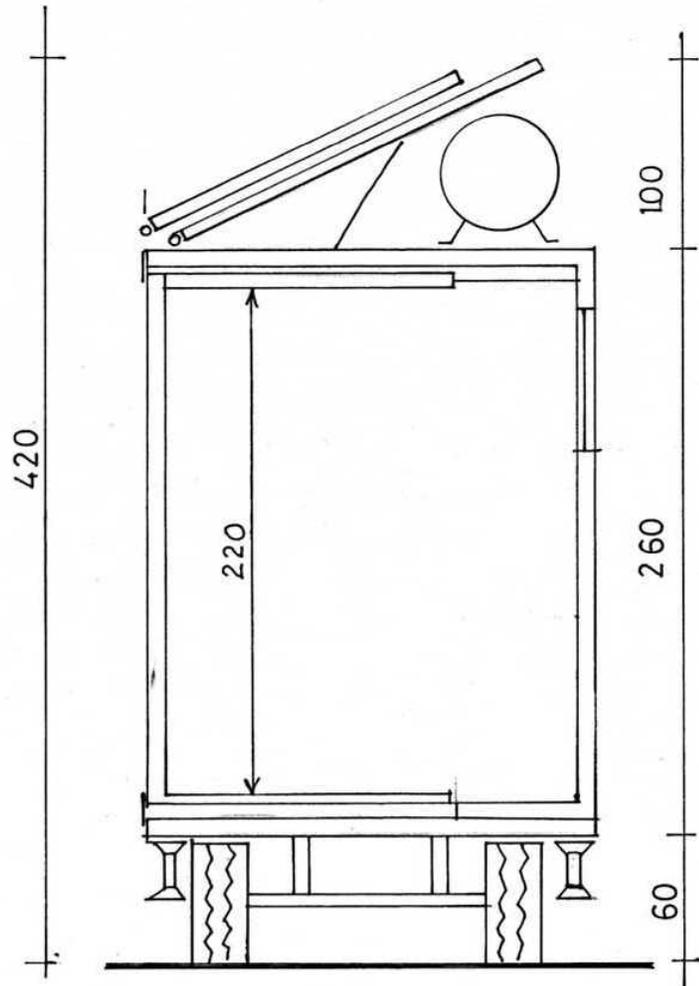
- Conçue en charpente métallique montée sur châssis avec quatre roues.
- Les cloisons et le plafond sont en panneaux sandwich formé de deux tôles galvanisées enserrant une mousse polyuréthane dont le coefficient thermique et acoustique offre une bonne isolation.
- Les panneaux sandwich du MOBILAB sont du type M1 (difficilement inflammable), suivant les normes anti-incendie.



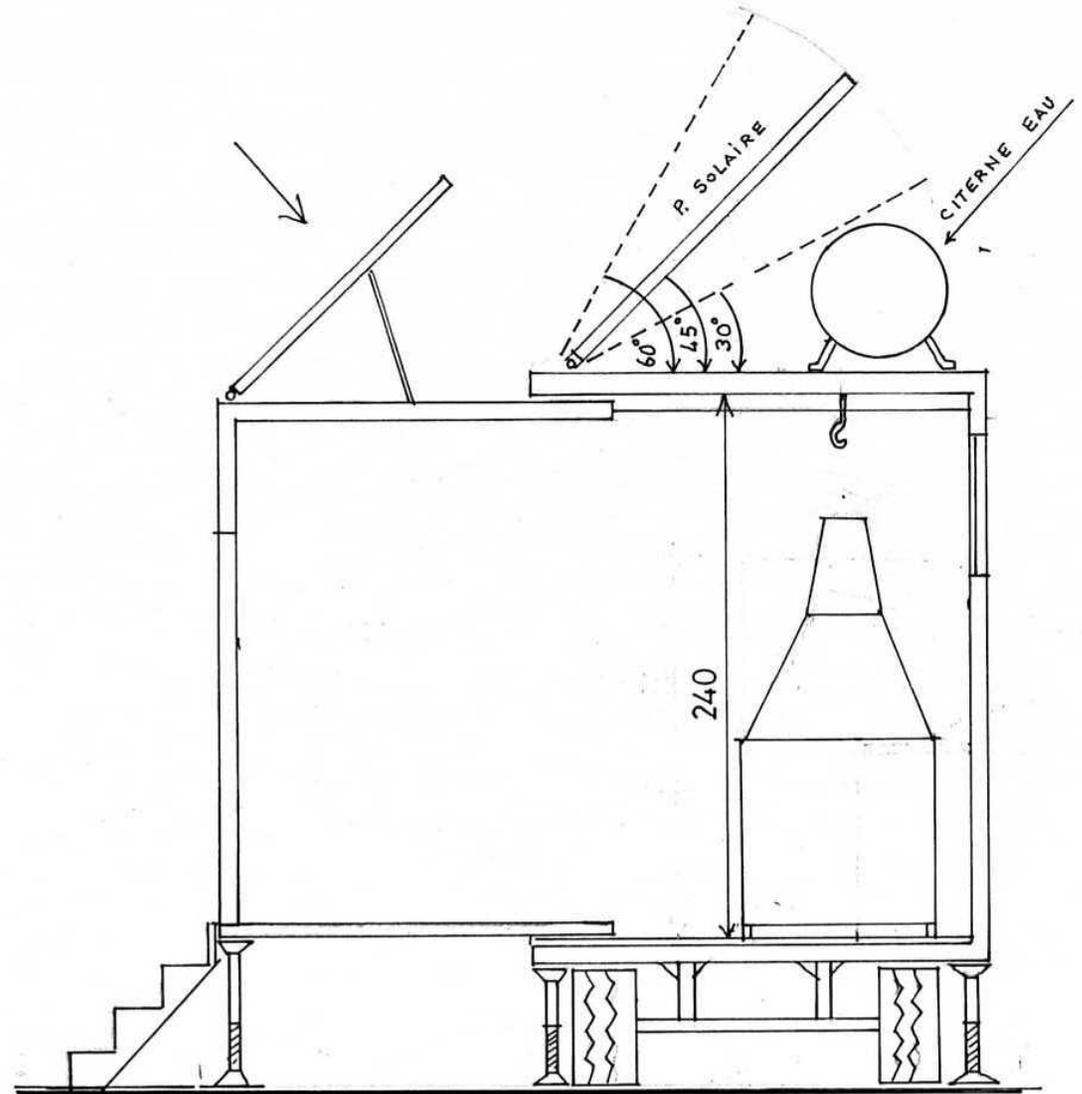
LE MOBILAB

- LE MOBILAB

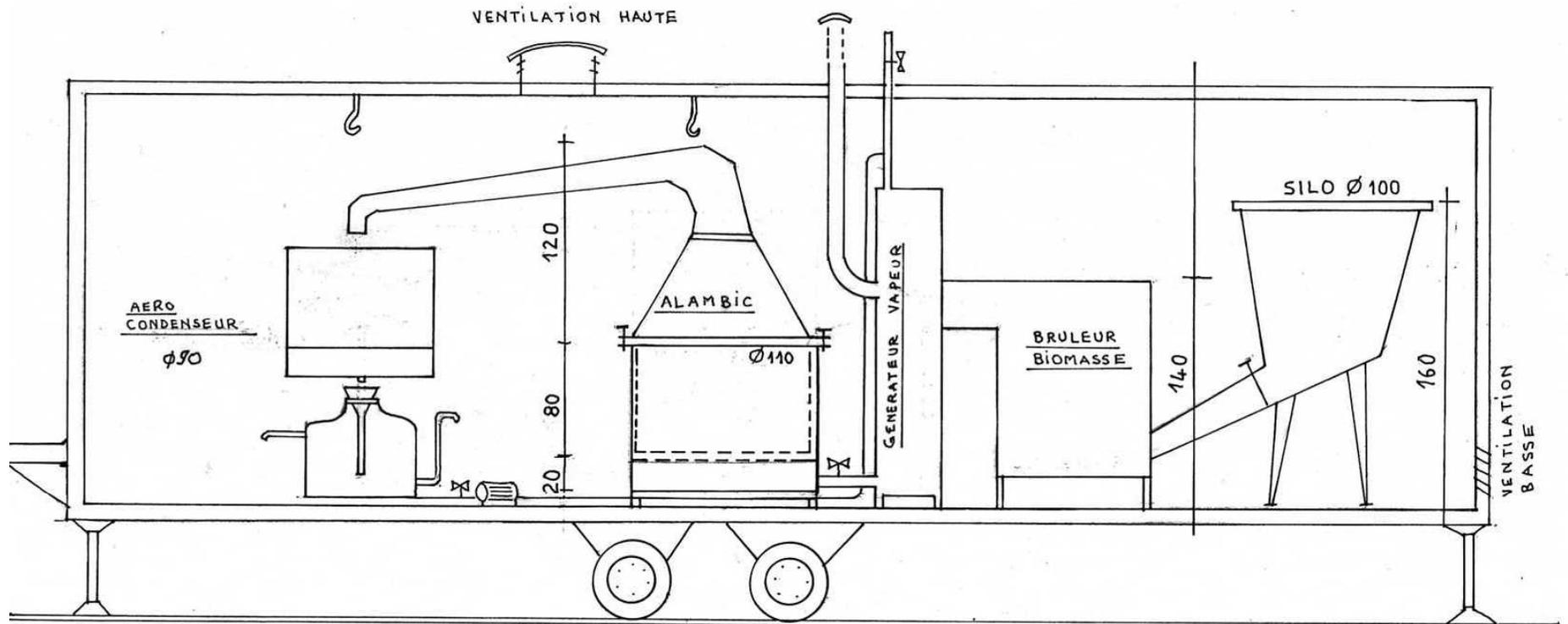
COUPE ECH 1:25



POSITION EN DÉPLACEMENT

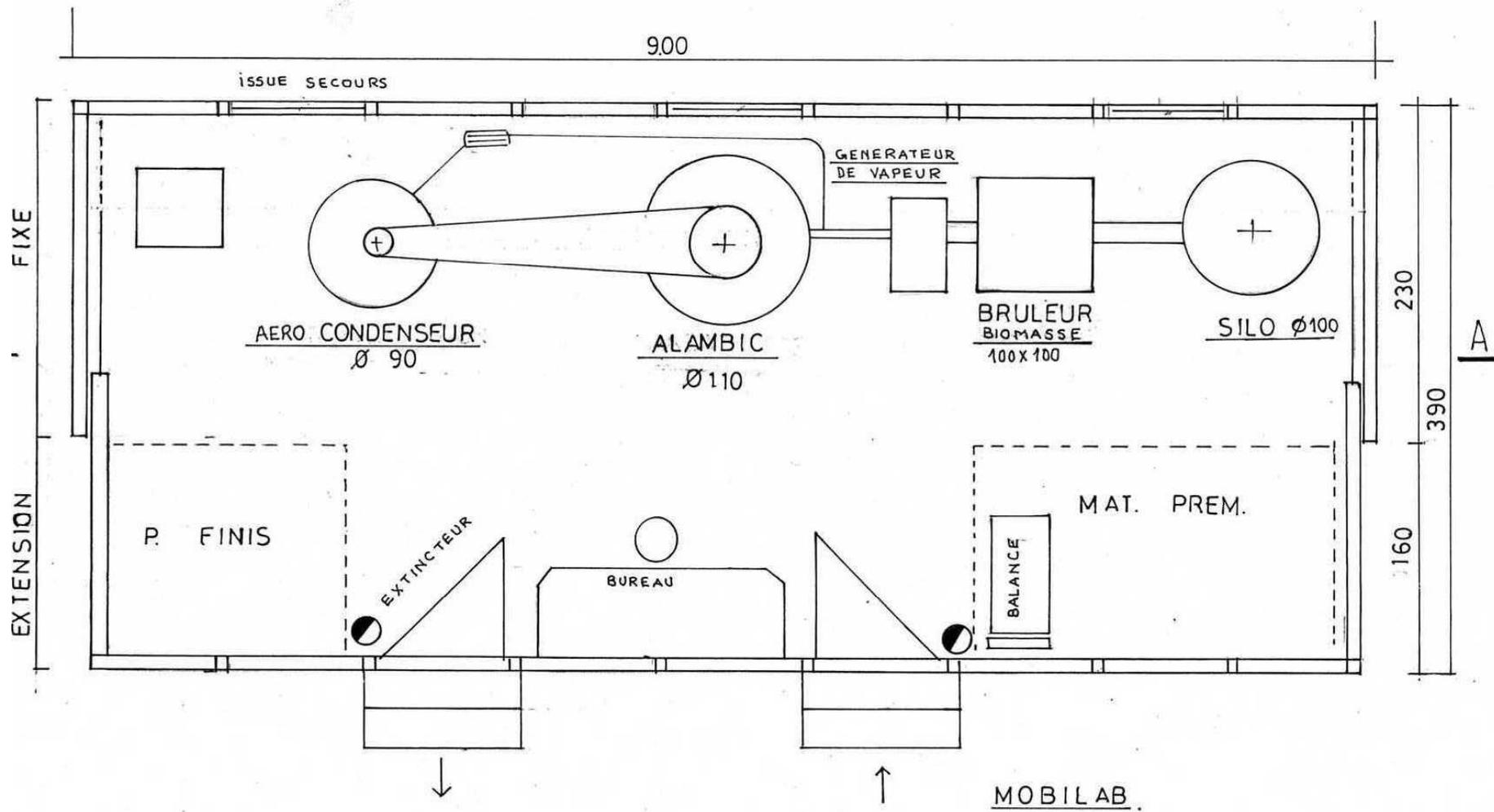


POSITION EN EXPLOITATION



MOBILAB

COUPE A A
ECH. 1:25°



VUE EN PLAN
ECH. 1:25

III. Production d'énergie par la biomasse

Sur la base de données sur la valeur énergétique de la biomasse issue de quelques plantes herbacées et non herbacées (Tableau IV), nous avons retenus pour nos calculs un pouvoir calorifique moyen de 4.44 KWh/Kg de biomasse végétale.

Tableau IV: Pouvoir calorifique, teneur en humidité et teneur en cendres de quelques sources de biomasse végétale [36].

Biomasse	humidité %	Pouvoir calorifique (MJ/Kg)	Pouvoir calorifique (KWh/Kg)	Teneur en cendres
Paille de blé	6.3	15.42	4.28	8
Paille de soja	8.7	14.87	4.13	6.5
Cannes de maïs	6.2	15.49	4.30	6
Coques de tournesol	7.1	17.22	4.78	3.6
Miscanthus	6-10	16.8	4.66	2.8-3.8
Chanvre (énergétique)	10-12	16.1	4.47	6.7-7
Paille de riz	20-25	13.5-14.4	3.75-4	-
Cannes de tournesol	25-30	12.4-13.5	3.44-3.75	-
Cannes de maïs	30-40	10.2-12.4	2.83-3.44	6
Paille de colza	10-15	15.3-16.2	4.25-4.5	-
Sciure et copeaux de bois	6.1	16.84	4.67	1.3
Peuplier noble	10-12	17.8	4.94	2-2.3

IV. Production d'énergie par les capteurs solaires

Pour notre étude sur les panneaux solaires nous avons utilisé un logiciel de dimensionnement solaire proposé par le bureau d'études techniques : TECSOL. Ce dernier est considéré comme un des pionniers des Energies Renouvelables en France et en Europe. Les compétences de TECSOL couvrent l'ensemble du secteur de l'équipement technique du bâtiment avec une forte dominante dans les domaines de l'énergie et de la communication électronique [35].

IV.1. Présentation du logiciel SOLO 2000 utilisé

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 [35].

IV.2. Détermination de la surface utile

On utilisera pour le calcul la surface totale utile, c'est à dire la surface active, qui capte réellement les rayons solaires. Cette surface est aussi appelée surface d'entrée : elle correspond à la surface de vitrage visible pour un capteur plan. Elle se différencie de la surface hors tout qui correspond à l'aire maximum de la projection du capteur complet, isolant latéral compris [35].

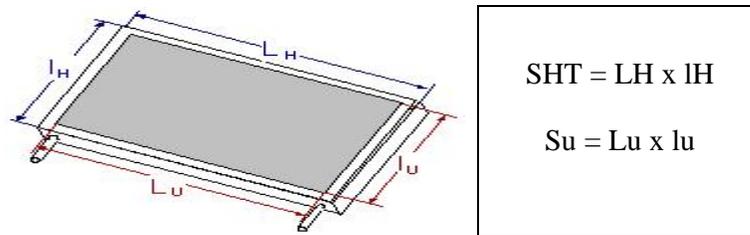


Figure 15: Dimensions de la surface utile(su) et la surface hors tout (SHT).

IV.3. 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 22 m². Pour optimiser l'occupation de ces 22m², nous avons optés pour 9 panneaux d'une surface individuelle de 2,32m² hors tout.

Tableau VI: Caractéristiques dimensionnelles et pondérales du capteur unitaire retenu

Paramètre	Dimensions
Surface (m ²)	2.32
Longueur (m)	2.039
Largeur (m)	1.139
Epaisseur (m)	70
Poids du capteur (kg)	127.5

IV.4. 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.

Pour ce concerne l'orientation, l'installation étant mobile, il est aisé d'orienter toujours les panneaux vers le sud pour optimiser leurs performances énergétiques [35]

IV.5. Définition du coefficient du rendement optique et du coefficient de pertes

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 [35].

IV.6. 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.

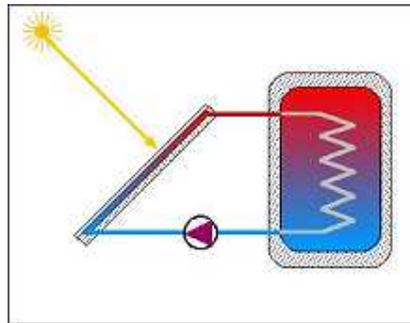


Figure 16: Type de chauffe eau choisi (à circulation forcée) [35].

IV.7. Détermination du volume du ballon d'eau chaude

La contenance du ballon d'eau chaude (800 litres) a été fixée de façon à couvrir la consommation journalière moyenne.

IV.8. 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 un calcul simple nous permet de l'évaluer, en fonction de la nature de l'isolant [35].

En résumé notre capteur est caractérisé par :

Tableau VII: Caractéristiques et réglages de l'inclinaison et de l'orientation des panneaux solaires du Mobilab.

Surface	22.0	m ²
Inclinaison	45	° /Horizontale
Orientation	0	°/Sud
Coefficient B	0.82	-
Coefficient K	3.47	W/m ² . °C

IV.9. Détails des calculs de l'apport énergétique des panneaux solaires

IV.9.1. Démarche adoptée

La démarche adoptée est la suivante. Les données nécessaires sont précisées ci-dessous.

a) On calcule les besoins énergétiques journaliers en moyenne mensuelle :

- consommation journalière et température d'eau froide en moyenne mensuelle,
- température de consigne de l'eau chaude supposée constante sur l'année.

b) On calcule le rayonnement global journalier en moyenne mensuelle :

On calcule le rayonnement global journalier 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 :

- rayonnement global horizontal journalier en moyenne mensuelle,
- inclinaison et orientation des capteurs.

c) On calcule le taux de couverture solaire en moyenne mensuelle par une équation empirique complexe utilisant les résultats des points a) et b) :

- -type de schéma
- - capteurs : surface totale S, paramètres B et K,
- - stock : volume V, constante de refroidissement CR, intérieur ou extérieur.

d) On en déduit les bilans énergétiques journaliers, mensuels et annuels :

SOLO permet d'analyser rapidement les conséquences d'un choix de conception ou de dimensionnement ou d'une évolution des besoins. La saisonnalité est prise en compte.

Enfin, les résultats obtenus ont été validés par l'expérience, en particulier par son utilisation depuis plus de 10 ans en Garantie de Résultats Solaires.

Le besoin énergétique moyen journalier B_j et le besoin annuel B s'écrivent en fonction de W et ΔT , sachant que la capacité calorifique massique de l'eau $C_{p_{e-liq}} = 1,16 \text{ Wh/litre}^\circ\text{C}$.

$$\text{Besoin journalier} = C_{p_{e-liq}} \times W_e \times [T_2 - T_1] = \frac{1.16}{1000} \times W_e \times [T_2 - T_1]$$

$$\text{Besoin annuel} = 365 B_j = 0.423 \times W \times [T_2 - T_1]$$

La production solaire moyenne journalière E_j et la productivité moyenne journalière E_{1j} s'écrivent :

$$E_j = S_c \times I_j \times R$$

$$E_{1j} = I_j \times R$$

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

Tableau VIII: Température extérieur et température de l'eau en fonction des mois de l'année [35]

Mois	Température extérieure	Température de l'eau
Janvier	11.0	14.2
Février	12.0	14.7
Mars	13.0	15.2
Avril	15.0	16.2
Mai	18.0	17.7
Juin	21.0	19.2
Juillet	24.0	20.7
Août	25.0	21.2
Septembre	23.0	20.2
Octobre	19.0	18.2
Novembre	15.0	16.2
Décembre	12.0	14.7

IV.9.2. Détermination des besoins énergétiques

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

IV.9.2.1. Quantité de Chaleur nécessaire pour l'échauffement de l'eau de 15°C à 100°C

$$Q_1 = Me \times Cp_{e-liq} \times [T_1 - T_0]$$

IV.9.2.2. Quantité de Chaleur nécessaire pour la vaporisation de l'eau à 100°C

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

IV.9.2.3. Quantité de Chaleur nécessaire pour la surchauffe de la vapeur de 100°C à 105°C

$$Q_3 = Me \times Cp_{e-vap} \times [T_2 - T_1]$$

IV.9.3. Exemple de calcul

Pour un débit de vapeur $Me=80l/jour$:

$$T_0 = 16^\circ C$$

$$T_1 = 100^\circ C$$

$$T_2 = 105^\circ C$$

$$\Delta H_{vap} = 2501 kJ / Kg$$

Echauffement :

$$Q_1 = 80 \times 1.16 \times 10^{-3} \times [100 - 16]$$

$$Q_1 = 7.80 kwh / jour$$

Vaporisation :

$$Q_2 = 80 \times 2501$$

$$Q_2 = 200080 kJ / jour$$

$$Q_2 = 50 kwh / jour$$

Surchauffe :

$$Q_3 = 80 \times 0.507 \times 10^{-3} \times [105 - 100]$$

$$Q_3 = 0.203 kwh / jour$$

Nous avons effectué le calcul pour :

- → Volume d'eau = 80 l/j
- → Température de sortie = 100°C
- → Constante de refroidissement = 0.7659 Wh/L.j.°C

Nous avons obtenu pour cela les valeurs suivantes :

Tableau IX: Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=80l/j [35].

	Irradiation capteurs (Wh/m ² .jour)	Besoins (kWh/mois)	Apports (kWh/mois)	Apports (kWh/jour)	Taux (%)	Volume (litres)
janvier	3093	248	160	5.2	64.8	80
février	4286	222	167	6.0	75.2	80
mars	5110	245	200	6.4	81.6	80
avril	5294	234	197	6.6	84.3	80
mai	5677	237	203	6.5	85.4	80
juin	5470	226	194	6.5	86.0	80
juillet	5676	229	198	6.4	86.5	80
août	5890	227	197	6.3	86.5	80
septembre	5548	223	190	6.3	85.2	80
octobre	4473	236	190	6.1	80.6	80
novembre	3202	234	163	5.4	69.7	80
décembre	2831	246	152	4.9	61.9	80

Tableau X: Taux de couverture solaire obtenu V=80l/j [35].

Couverture solaire	78.8	%	Apport solaire annuel	2211	kWh/an
Besoin annuel	2806	kWh/an	Productivité annuelle	101	kWh/m ² /an

Ainsi que pour :

- → Volume d'eau = 400 l/j
- → Température de sortie = 100°C
- → Constante de refroidissement = 0.3119 Wh/L.j.°C

Nous avons obtenu pour cela les valeurs suivantes :

Tableau XI: Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=400l/j [35].

	Irradiation capteurs (Wh/m ² .jour)	Besoins (kWh/mois)	Apports (kWh/mois)	Apports (kWh/jour)	Taux (%)	Volume (litres)
janvier	3093	1238	611	19.7	49.4	400
février	4286	1111	696	24.9	62.6	400
mars	5110	1223	882	28.5	72.1	400
avril	5294	1170	897	29.9	76.7	400
mai	5677	1187	950	30.6	80.0	400
juin	5470	1128	910	30.3	80.7	400
juillet	5676	1144	941	30.3	82.2	400
août	5890	1137	939	30.3	82.6	400
septembre	5548	1114	885	29.5	79.4	400
octobre	4473	1180	818	26.4	69.3	400
novembre	3202	1170	628	20.9	53.7	400
décembre	2831	1230	571	18.4	46.4	400

Tableau XII: Taux de couverture solaire obtenu V=400l/j [35].

Couverture solaire	69.3	%	Apport solaire annuel	9729	kWh/an
Besoin annuel	14031	kWh/an	Productivité annuelle	442	kWh/m ² .an

De même pour :

- → Volume d'eau = 800 l/j
- → Température de sortie = 100°C
- → Constante de refroidissement = 0.2333 Wh/L.j.°C

Nous avons obtenu pour cela les valeurs suivantes :

Tableau XIII: Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=800l/j [35].

	Irradiation capteurs (Wh/m ² .jour)	Besoins (kWh/mois)	Apports (kWh/mois)	Apports (kWh/jour)	Taux (%)	Volume (litres)
janvier	3093	2475	855	27.6	34.5	800
février	4286	2223	1026	36.6	46.1	800
mars	5110	2446	1348	43.5	55.1	800
avril	5294	2339	1390	46.3	59.4	800
mai	5677	2374	1519	49.0	64.0	800
juin	5470	2256	1450	48.3	64.3	800
juillet	5676	2288	1532	49.4	67.0	800
août	5890	2273	1552	50.1	68.3	800
septembre	5548	2228	1420	47.3	63.7	800
octobre	4473	2360	1226	39.6	52.0	800
novembre	3202	2339	882	29.4	37.7	800
décembre	2831	2461	792	25.6	32.2	800

Tableau XIV: Taux de couverture solaire obtenu V=800l/j [35].

Couverture solaire	53.4	%	Apport solaire annuel	14992	kWh/an
Besoin annuel	28062	kWh/an	Productivité annuelle	681	kWh/m ² .an

De même pour :

- → Volume d'eau = 1600 l/j
- → Température de sortie = 100°C
- → Constante de refroidissement = 0.1791 Wh/L.j.°C

Nous avons obtenu pour cela les valeurs suivantes :

Tableau XV: Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=1600l/j [35].

	Irradiation capteurs (Wh/m ² .jour)	Besoins (kWh/mois)	Apports (kWh/mois)	Apports (kWh/jour)	Taux (%)	Volume (litres)
janvier	3093	4950	1044	33.7	21.1	1600
février	4286	4445	1291	46.1	29.1	1600
mars	5110	4892	1721	55.5	35.2	1600
avril	5294	4679	1770	59.0	37.8	1600
mai	5677	4748	1967	63.5	41.4	1600
juin	5470	4511	1869	62.3	41.4	1600
juillet	5676	4575	2005	64.7	43.8	1600
août	5890	4546	2059	66.4	45.3	1600
septembre	5548	4456	1862	62.1	41.8	1600
octobre	4473	4719	1554	50.1	32.9	1600
novembre	3202	4679	1079	36.0	23.1	1600
décembre	2831	4921	963	31.1	19.6	1600

Tableau XVI: Taux de couverture solaire obtenu V=1600l/j [35].

Couverture solaire	34.2	%	Apport solaire annuel	19183	kWh/an
Besoin annuel	56123	kWh/an	Productivité annuelle	872	kWh/m ² .an

Et enfin pour :

- → Volume d'eau = 4000 l/j
- → Température de sortie = 100°C
- → Constante de refroidissement = 0.1291 Wh/L.j.°C

Nous avons obtenu pour cela les valeurs suivantes :

Tableau XVII: Besoins et apports énergétiques en fonction des mois pour V=4000l/j [35].

	Irradiation capteurs (Wh/m ² .jour)	Besoins (kWh/mois)	Apports (kWh/mois)	Apports (kWh/jour)	Taux (%)	Volume (litres)
janvier	3093	12375	1187	38.3	9.6	4000
février	4286	11113	1501	53.6	13.5	4000
mars	5110	12231	2009	64.8	16.4	4000
avril	5294	11697	2053	68.4	17.6	4000
mai	5677	11871	2303	74.3	19.4	4000
juin	5470	11279	2184	72.8	19.4	4000
juillet	5676	11438	2364	76.3	20.7	4000
août	5890	11366	2450	79.0	21.6	4000
septembre	5548	11139	2213	73.8	19.9	4000
octobre	4473	11799	1818	58.7	15.4	4000
novembre	3202	11697	1234	41.1	10.6	4000
décembre	2831	12303	1093	35.3	8.9	4000

Tableau XVIII: Taux de couverture solaire obtenu V=4000l/j [35].

Couverture solaire	16.0	%	Apport solaire annuel	22408	kWh/an
Besoin annuel	140308	kWh/an	Productivité annuelle	1019	kWh/m ² .an

Voici le tableau représentant les besoins énergétiques à l'échauffement, à la vaporisation et la surchauffe :

Tableau XIX: Besoins énergétiques en fonction du débit volumique.

Besoins énergétiques (kWh/j)	Débit volumique (l/j)				
	80(l/j)	400(l/j)	800(l/j)	1600(l/j)	4000(l/j)
Echauffement	234	1169	2339	4677	11693
vaporisation	50	250	500	1000	2500
surchauffe	3.898	19.488	38.976	77.952	194.880
Total	287.90	1438.49	2877.97	5754.95	14387.88

Le tableau suivant regroupe les résultats obtenus par le calcul des pourcentages de contribution de l'énergie solaire et de la biomasse au recouvrement des besoins de production de vapeur d'eau :

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

Masse de matière végétale (Kg)	Débit volumique (l/j)	Besoins (kWh/j)	Solaire (kWh/j)	Solaire %	Biomasse (kWh/j)	Biomasse %	Solaire et biomasse (kWh/j)	Solaire et biomasse %	Ce qui reste à fournir(%)
100	80	59	6.09	10.32	444.4	+753.28	450.5	+763.5	
	400	290	26.64	9.18	444.4	+153.25	471.04	+162.4	
	800	580	41.06	7.08	444.4	76.63	485.46	83.71	16.29
	1600	1161	52.54	4.53	444.4	38.28	496.94	42.81	57.19
	4000	2900	61.37	2.12	444.4	15.32	505.77	17.44	82.56
200	80	59	6.09	10.32	888.8	+1506.57	894.89	+1516.89	
	400	290	26.64	9.18	888.8	+306.51	915.44	+315.69	
	800	580	41.06	7.08	888.8	+153.26	929.86	+160.34	
	1600	1161	52.54	4.53	888.8	76.56	941.34	81.09	18.91
	4000	2900	61.37	2.12	888.8	30.65	950.17	32.77	67.23
500	80	59	6.09	10.32	2222	+3766	2228.09	+3776.32	
	400	290	26.64	9.18	2222	+766.28	2248.64	+775.46	
	800	580	41.06	7.08	2222	+383.14	2263.06	+390.22	
	1600	1161	52.54	4.53	2222	+191.41	2274.54	+195.94	
	4000	2900	61.37	2.12	2222	76.62	2283.37	78.74	21.26
800	80	59	6.09	10.32	3555	+6026.35	3561.09	+6036.67	
	400	290	26.64	9.18	3555	+1226.05	3581.64	+1235.23	
	800	580	41.06	7.08	3555	+613.02	3596.06	+620.1	
	1600	1161	52.54	4.53	3555	+306.25	3607.54	+310.78	
	4000	2900	61.37	2.12	3555	+122.60	3616.37	+124.72	
1000	80	59	6.09	10.32	4444	+7532.95	4450.09	+7543.27	
	400	290	26.64	9.18	4444	+1532.56	4470.64	+1541.74	
	800	580	41.06	7.08	4444	+766.28	4485.06	+773.36	
	1600	1161	52.54	4.53	4444	+382.81	4496.54	+387.34	
	4000	2900	61.37	2.12	4444	+153.25	4505.37	+155.37	

Si on considère une déperdition de 20%, les besoins énergétiques considérés seront augmentés.
 Pour les deux derniers débits, on obtient :

Tableau XXI: Pourcentage de contribution de l'énergie solaire et de la biomasse au recouvrement des besoins de production de vapeur d'eau en considérant les déperditions.

Masse de matière végétale (Kg)	Débit volumique (l/j)	Besoins + 20 % (kWh/j)	Solaire (kWh/j)	Solaire %	Biomasse (kWh/j)	Biomasse %	Solaire et biomasse (kWh/j)	Solaire et biomasse %	Ce qui reste à fournir %
800	800	696	41,06	5,90	3555,00	612,93	3596,06	620,01	40,0
	1600	1393,2	52,54	3,77	3555,00	306,20	3607,54	310,73	-850,3
1000	800	696	41,06	5,90	4444,00	766,21	4485,06	773,29	193,3
	1600	1393,2	52,54	3,77	4444,00	382,77	4496,54	387,30	-773,7

Le signe (-) représente l'énergie à fournir, le signe (+) représente l'énergie en surplus.

NOMENCLATURE

Constantes :

Nom	description	Unité	Valeur
ΔH_{vap}	Chaleur de vaporisation de l'eau	kJ/kg	2501
Cp_{e-vap}	Chaleur massique de la vapeur d'eau	$J/kg^{\circ}C$	1830
Cp_{e-liq}	Chaleur massique de l'eau	$J/kg^{\circ}C$	4186
Cp_{air}	Chaleur massique de l'air sec	$J/kg^{\circ}C$	1006

Paramètres :

Nom	description	Unité
Me	Débit volumique de l'eau	$l/jour$
$Me_{refroidissement}$	Débit massique de l'eau de refroidissement	kg/h
Q_1	Energie échangée pour la désurchauffe	$kcal/h$
Q_2	Energie échangée pour la condensation	$kcal/h$
Q_3	Energie échangée pour le refroidissement	$kcal/h$
Q_{total}	Energie totale échangée	$kcal/h$
U	Coefficient d'échange global	$kcal / h.m^2.^{\circ}C$
r_i	Coefficient de film interne	$hm^2.^{\circ}C / kcal$
r_d	Coefficient d'encrassement	$hm^2.^{\circ}C / kcal$
r_a	Coefficient du film extérieur (air)	$hm^2.^{\circ}C / kcal$
r_m	Résistance au transfert due au métal	$hm^2.^{\circ}C / kcal$
r	Résistance globale	$hm^2.^{\circ}C / kcal$
Vf	Vitesse faciale de l'air	m/s
A	Surface d'échange	m^2
R	Rapport thermique	-
T_0	Température de l'eau à la sortie	$^{\circ}C$
T_1	Température de vaporisation de l'eau	$^{\circ}C$
T_2	Température de l'eau à l'entrée	$^{\circ}C$
t_1	Température de l'air à l'entrée	$^{\circ}C$
t_2	Température de l'air à la sortie	$^{\circ}C$
DTLM	Température moyenne logarithmique	$^{\circ}C$
P(CV)	Puissance absorbée	<i>Cheval Vapeur</i>
S	Charge calorifique réduite	$kcal/h^{\circ}C$
K	Coefficient de puissance	$^{\circ}C$

Dimensionnement de l'aérocondenseur

I. Description des réfrigérants

Il existe deux types de réfrigérants utilisant l'air comme fluide refroidisseur.

I.1. Réfrigérants secs

Les deux fluides ne sont pas en contact dans ces appareils. On distingue deux types de réfrigérants caractérisés par l'évolution du fluide à refroidir :

- **Les aéroréfrigérants**, dans lesquels le fluide est simplement refroidi sans changement d'état ;
- **Les aérocondenseurs**, dans lesquels la vapeur subit un changement d'état.

I.1.1. Aéroréfrigérants

Dans ces réfrigérants, le fluide à refroidir est mis en circulation par une pompe ou un ventilateur, selon sa nature, et traverse un ensemble de tubes ou profilés dont la paroi extérieure est soumise à une circulation d'air naturelle ou forcée. L'adoption d'un tel système est obligatoire lorsque le fluide à refroidir n'est pas de l'eau ou de la vapeur d'eau. Il comporte, par ailleurs, 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 :

- La séparation totale des fluides permet de conserver les qualités du fluide à refroidir ; tous les fluides (liquides ou gazeux) peuvent être refroidis par ce procédé ;
- Il n'y a pas de pollution de l'air de refroidissement, si ce n'est un réchauffage, car il n'est jamais en contact avec le fluide refroidi ; en particulier, les retombées de buées ou de gouttes sont pratiquement inexistantes dans l'environnement ;
- Le fluide à refroidir ne subit aucune pollution due à l'air de refroidissement ;
- Ce système ne demande aucun appoint de fluide à refroidir pendant ou après son passage dans l'Aéroréfrigérant ;
- Il est particulièrement adapté au refroidissement des fluides sans limite de température.

Les avantages ci-dessus admettent naturellement que les matériaux entrant dans la construction n'apportent pas, par leur présence, des possibilités de corrosion ou de pollution.

Ces réfrigérants présentent malheureusement un certain nombre d'inconvénients qui conduisent en général, lorsque cela est possible, à adopter pour le refroidissement de l'eau un réfrigérant humide. On notera en particulier :

- Le prix élevé de l'appareil (de quatre à cinq fois plus cher qu'un réfrigérant humide selon les conditions de marche) ;
- Parallèlement, des frais de fonctionnement importants dus aux puissances de ventilation nécessaires ;

- Une plus grande complexité de conduite, notamment au démarrage et en période froide;
- L'impossibilité d'obtenir des basses températures d'eau refroidie (la limite théorique est celle de l'air ambiant).

I.1.2. Aérocondenseurs

Ces appareils fonctionnent sur le même principe que les aéroréfrigérants. Le fluide à refroidir est en général de la vapeur d'eau.

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.

La principale utilité de ces appareils est de supprimer un étage intermédiaire de refroidissement (le condenseur) dans le cycle de la condensation de vapeur, ce qui peut être un avantage sur des groupes de faible ou moyenne puissance. Comparativement aux réfrigérants humides, ils ont le défaut de donner des températures de condensation relativement élevées et de conduire à des coûts d'investissement et de fonctionnement plus importants. Leur utilisation est en général réservée, pour les aérocondenseurs de puissance moyenne, aux régions sèches, sans aucune possibilité de trouver de l'eau d'appoint.

Une difficulté supplémentaire se présente pour les fortes puissances : le diamètre des tuyauteries d'arrivée de vapeur à l'aérocondenseur devient important (plusieurs mètres), ainsi que l'encombrement global de l'installation.

I.2. Réfrigérants humides

Dans ces appareils, les deux fluides sont mis en contact de manière aussi intime que possible, et pendant le temps le plus long possible pour favoriser le transfert de chaleur qui s'opère à la fois par convection et, principalement, par évaporation.

Les réfrigérants atmosphériques basés sur ce principe peuvent se classer en trois catégories :

- **Les réfrigérants atmosphériques à tirage naturel**, généralement employés pour le refroidissement de volumes d'eau importants ;
- **Les réfrigérants atmosphériques à circulation d'air forcée par ventilateurs**, qui constituent la majorité des appareils industriels réalisés ;
- **Les réfrigérants monoblocs**, qui sont des réfrigérants industriels préfabriqués livrés prêts à l'utilisation.

II. Description générale

Les aéroréfrigérants usuels comportent des rangées superposées de tubes à ailettes (fins tubes). 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.

III. Description schématisée

Le schéma suivant représente un aérocondenseur sec :

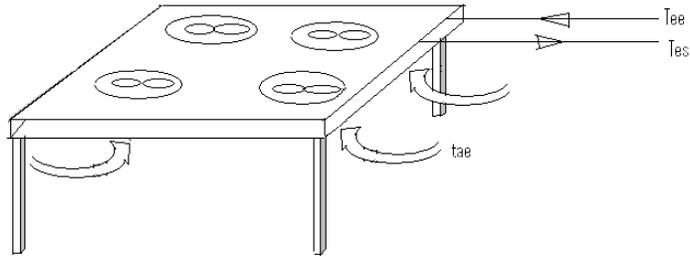


Figure 17: Schéma d'un aérocondenseur sec [11].

La représentation suivante illustre le fonctionnement d'un aérocondenseur sec, c'est-à-dire un échangeur de chaleur entre eau chaude+huile essentielle et de l'air dont l'objectif est de refroidir le mélange d'eau et d'huile essentielle :

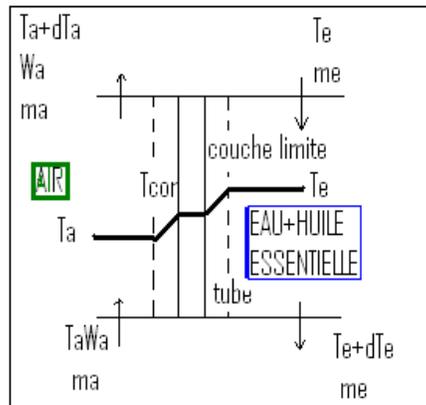


Figure 18: Représentation schématique de l'échange thermique [11].

L'hypothèse est faite de l'homogénéité de l'eau et de l'air en dehors de la couche limite. L'échange entre le courant d'air et le tube s'écrit de la façon suivante [5] :

$$dQ = U dA(T_a - T_{tube})$$

Si on néglige la conduction dans le tube du fait de la grande conductivité des matériaux employés devant les phénomènes convectifs, l'échange de chaleur entre le tube et le courant d'eau s'exprime alors :

$$dQ = U dA(T_{tube} - T_{eau})$$

L'échange de chaleur et de masse au sein de l'aérocondenseur par l'expression suivante de la puissance :

$$dQ = U dA(T_a - T_e)$$

$$\Rightarrow Q = U A DTLM$$

IV. Description mathématique

IV.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 $C = f(T)$ pour l'eau entre les températures 16°C et 100°C et la vapeur d'eau entre 100°C et 400°C [13]. La courbe obtenue dans le cas de l'eau est la suivante :

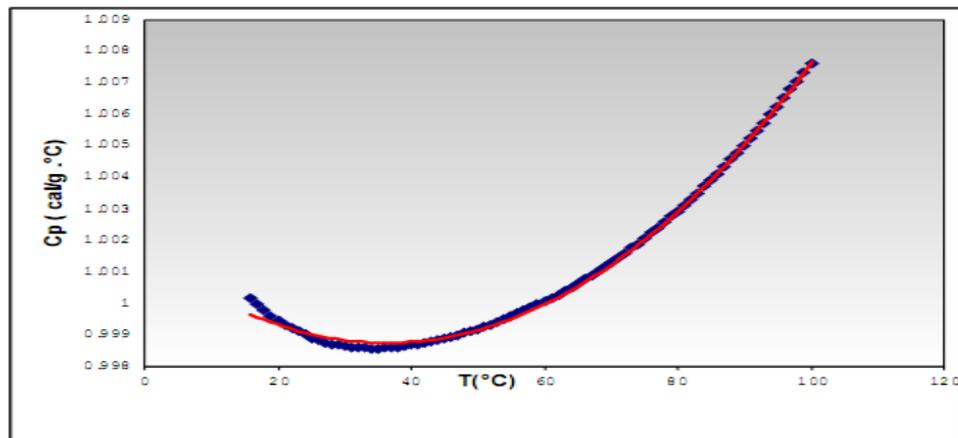


Figure 19: évolution de la chaleur spécifique de l'eau en fonction de la température [13].

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

$$Cp(T) = 2.10^{-6}T^2 - 0.0002T + 1.0017$$

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

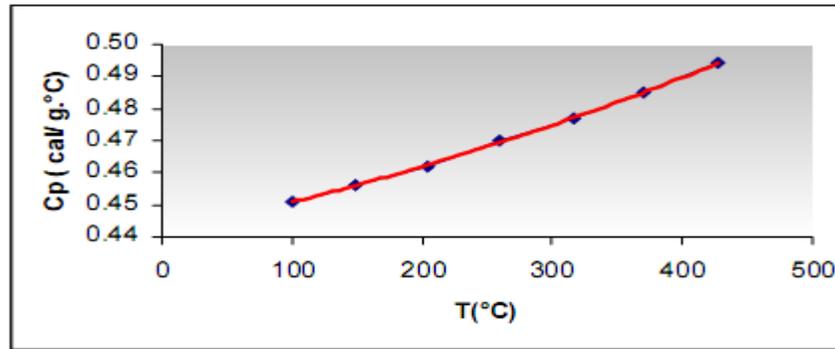


Figure 20: Evolution de la chaleur spécifique de la vapeur d'eau en fonction de la température [13].

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

$$Cp(T) = 9.10^{-8}T^2 + 8.10^{-5}T + 0.4417$$

Donc, à l'aide de cette équation nous pouvons calculer la chaleur spécifique moyenne, dans un intervalle donné de température, en utilisant la relation suivante :

$$Cp_{moy}(T_1, T_2) = \frac{1}{(T_2 - T_1)} \int_{T_1}^{T_2} Cp dT$$

IV.1.1. Chaleur spécifique moyenne dans l'intervalle de température [25,100°C]

$$Cp_{moy}(25,100^\circ C) = \frac{1}{(100 - 25)} Cp(T) = \frac{1}{75} \int_{25}^{100} (2.10^{-6} T^2 - 0.0002T + 1.0017) dT$$

$$Cp_{moy}(25,100^\circ C) = \frac{1}{75} \left[2.10^{-6} \frac{T^3}{3} - 0.0002 \frac{T^2}{2} + 1.0017T \right]_{25}^{100}$$

$$Cp_{moy}(25,100^\circ C) = \frac{1}{75} \left[\frac{2.10^{-6}}{3} (100^3 - 25^3) - 0.0001(100^2 - 25^2) + 1.0017(100 - 25) \right]$$

$$Cp_{moy}(25,100^\circ C) = 0.997 \text{ cal / g } ^\circ C$$

$$Cp \text{ moy [25, 100}^\circ C] = 0.997 \text{ cal/g } ^\circ C$$

IV.1.2. Chaleur spécifique moyenne dans l'intervalle de température [100,105°C]

$$Cp_{moy}(100,105^\circ C) = \frac{1}{(378 - 373)} \int_{373}^{378} (9.10^{-8}T^2 + 8.10^{-5}T + 0.4417) dT$$

$$Cp_{moy}(100,105^\circ C) = \frac{1}{5} \left[3.10^{-8} (378^3 - 373^3) + 4.10^{-5} (378^2 - 373^2) + 0.4417(378 - 373) \right]$$

$$Cp_{moy}(100,105^\circ C) = 0.4508 \text{ cal / g } ^\circ C$$

$$Cp \text{ moy [100, 105}^\circ C] = 0.4508 \text{ cal/g } ^\circ C$$

IV.2. Détermination du rapport thermique

$$R = \frac{T_2 - T_0}{T_2 - t_1} \quad [4]$$

$$R = \frac{105 - 25}{105 - 16} = \frac{80}{89} = 0.89$$

$$R = 0.89$$

IV.3. Détermination de l'énergie nécessaire au refroidissement

L'énergie totale se retrouve à partir des états du fluide primaire et du fluide secondaire en considérant les trois zones suivantes:

- La désurchauffe de l'eau de 105 °C à 100 °C ;
- La condensation à température constante $T_1=100$ °C ;
- Le refroidissement du condensât de 100 °C à 25 °C.

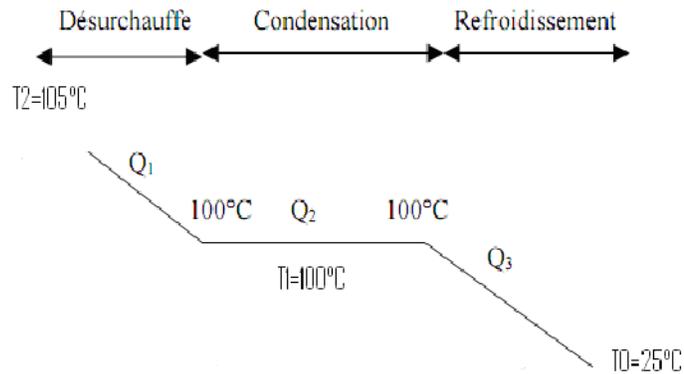


Figure 21: Profil d'évolution de la température dans le condenseur pour une vapeur à 105°C.

IV.4. Détermination des températures d'entrée et de sortie de l'aérocondenseur

Nous définissons les températures d'entrée et de sortie des fluides circulant à contre courant comme suit :

$$T_2 = 105^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 25^\circ\text{C}$$

$$t_1 = 16^\circ\text{C}$$

t_2 = Température de sortie de l'eau de refroidissement

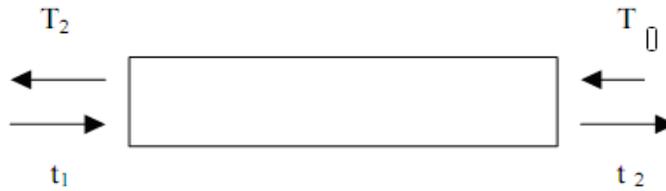


Figure 22: températures des fluides chaud et froid à l'entrée et sortie de l'aérocondenseur.

IV.5. Estimation des différentes quantités de chaleur échangées

IV.5.1. Estimation de la chaleur de désurchauffe

$$Q_1 = Me \times Cp_{e-vap} \times [T_2 - T_1]$$

$$Q_1 = \frac{1600}{24} \times \frac{1830}{4.186} \times [105 - 100]$$

$$Q_1 = 145.7 \text{ kcal/h}$$

Tableau XXII: Chaleur de surchauffe en fonction des débits de vapeur.

Me (l/jour)	800	1600
Q_1 (kcal/h)	7,3	145,7

IV.5.2. Estimation de la Chaleur de condensation

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

$$Q_2 = \frac{1600}{24} \times \frac{2501 \times 10^3}{4.186}$$

$$Q_2 = 39832 \text{ kcal/h}$$

Tableau XX111: Chaleur de condensation en fonction des débits de vapeur.

Me (l/jour)	800	1600
Q_2 (kcal/h)	19 916	39 832

IV.5.3. Estimation de la Chaleur de refroidissement

$$Q_3 = Me \times Cp_{e-liq} \times [T_1 - T_0]$$

$$Q_3 = \frac{1600}{24} \times \frac{4186}{4.186} \times [100 - 25]$$

$$Q_3 = 5000 \text{ kcal/h}$$

Tableau XXIV: Chaleur de refroidissement en fonction des débits de vapeur.

Me (l/jour)	800	1600
Q_3 (kcal/h)	2500	5000

IV.5.4. Estimation de la Chaleur totale échangée

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{total} = 145.7 + 39832 + 5000$$

$$Q_{total} = 45\ 000 \text{ kcal/h}$$

Tableau XXV: Chaleur totale échangée en fonction des débits de vapeur.

Me (l/jour)	800	1600
Q_{total} (kcal/h)	22 500	45 000

IV.6. Détermination de la charge calorifique réduite

$$S = \frac{Q \times 10^{-3}}{T_1 - t_1} \quad [4]$$

$$S = \frac{45000 \times 10^{-3}}{105 - 16} = 0.51 \text{ Kcal/h}^\circ\text{C}$$

Tableau XXVI: Charge calorifique réduite en fonction des débits de vapeur.

Me (l/jour)	800	1600
S (kcal/h°C)	0.255	0.51

IV.7. Détermination de la résistance globale

r = coefficient de film interne r_i + coefficient d'encrassement r_d

Ces valeurs sont rassemblées pour divers effluents dans le tableau suivant :

Tableau XXVII: Résistance globale pour différents fluides (aérocondenseur) [4].

Fluide	Coefficient de film interne r_i	Coefficient d'encrassement r_d	Résistance globale $r(hm^2\text{°C} / kcal)$
Eau	0.00016	0.0002	0.00036
Solution aqueuse	0.00020	0.0004	0.00060
GPL	0.00040	0.0002	0.00060

IV.8. Calcul du coefficient d'échange global

Le coefficient d'échange global $U(kcal/h.m^2.\text{°C})$ de l'aérocondenseur est déterminé par la relation suivante :

$$\frac{1}{U} = r_i + r_d + r_m + r_a$$

r_m : Résistance au transfert due au métal le plus souvent égale à $0.00015 (hm^2\text{°C} / kcal)$

r_a : Coefficient du film extérieur (air)

$$U = \frac{1}{r_i + r_d + r_m + r_a}$$

$$U = \frac{1}{0.0002 + 0.00016 + 0.00015 + 0.00096}$$

$$U = 680 kcal / hm^2\text{°C}$$

IV.9. Détermination du nombre de rangées et de la vitesse faciale de l'air

N et Vf sont obtenus directement à partir du tableau connaissant $\frac{T_1 - t_1}{U}$

Tableau XXVIII: Coefficient de film extérieur et vitesse faciale de l'air (aérocondenseur) [4].

$\frac{T_1 - t_1}{U}$	nombre de rangées N	r_a : Coefficient du film extérieur ($hm^2°C / kcal$)	Vitesse faciale de l'air Vf (m/s)
$\frac{T_1 - t_1}{U} < 0.13$	3	0.00096	3.20
$0.13 < \frac{T_1 - t_1}{U} < 0.17$	4	0.00102	3.02
$0.17 < \frac{T_1 - t_1}{U} < 0.22$	5	0.00107	2.87
$0.22 < \frac{T_1 - t_1}{U} < 0.28$	6	0.00112	2.74
$0.28 < \frac{T_1 - t_1}{U} < 0.36$	7	0.00118	2.58
$0.36 < \frac{T_1 - t_1}{U} < 0.46$	8	0.00121	2.48
$0.46 < \frac{T_1 - t_1}{U} < 0.58$	9	0.00125	2.38
$0.58 < \frac{T_1 - t_1}{U} < 0.73$	10	0.00128	2.26
$0.73 < \frac{T_1 - t_1}{U}$	11	0.00132	2.16

D'après le tableau pour $\frac{T_1 - t_1}{U} = 0.129$, on obtient :

Le nombre de rangées N=3

Vitesse faciale de l'air Vf=3.2 m/s

IV.10. Calcul de la puissance absorbée

On détermine tout d'abord le coefficient K à partir de la figure 18 connaissant les valeurs R et r.

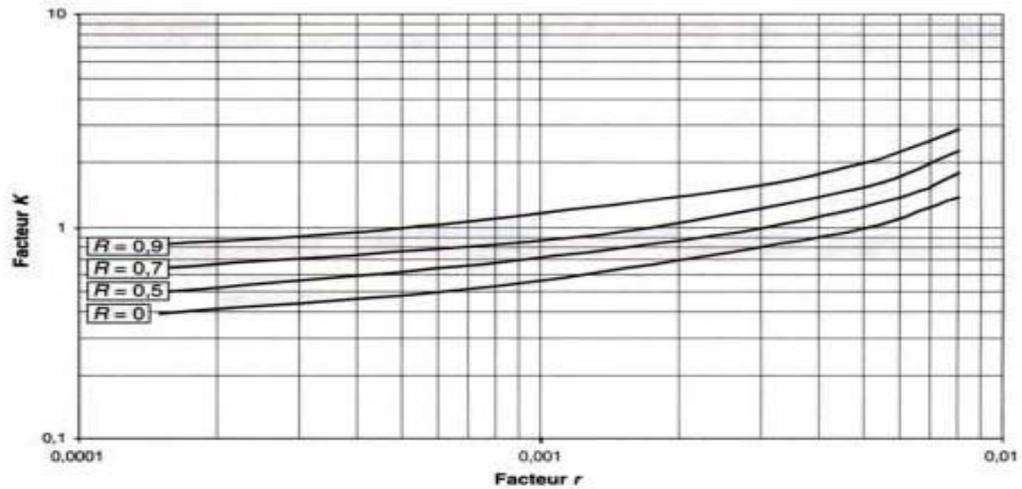


Figure 23 : Détermination du coefficient K en fonction de r et R pour les aérocondenseur [4].

On trouve pour :

$$R = 0.89$$

$$r = 0.00036$$

D'après la lecture sur l'abaque $K = 0.9$

On calcul ensuite la puissance absorbée à l'aide de l'expression suivante :

$$P = K.S \quad [4]$$

$$P \text{ (en Cheval vapeur)} = K \cdot \frac{Q \times 10^{-3}}{T_1 - t_1}$$

$$P(CV) = 0.9 \times \frac{45000 \times 10^{-3}}{105 - 16}$$

$$P = 0.455 CV$$

$$P = 288 \text{ kcal/h}$$

Tableau XXIX: Puissance absorbée en fonction des débits de vapeur.

Me (l/jour)	800	1600
S (Kcal/h°C)	0.255	0.510
P (Kwatt)	0.168	0.335
P (Kcal/h)	144	288

IV.11. Calcul de la température de sortie de l'air chaud

Cette température est obtenue en fonction de la puissance absorbée et de la vitesse faciale de l'air par la relation suivante :

$$t_2 = \frac{Q}{1061 \times V_f \times P} + t_1$$

$$t_2 = \frac{T_2 - t_1}{1061 \times V_f \times K \times 10^{-3}} + t_1$$

Pour une vitesse faciale de l'air $V_f = 3.2$ m/s, on obtient :

$$t_2 = \frac{105 - 16}{1061 \times 3.20 \times 0.9 \times 10^{-3}} + 16$$

$$t_2 = 45^\circ C$$

IV.12. Calcul de la DTLM

La valeur de différence moyenne logarithmique pour un échangeur à contre-courant s'exprime comme suit [15]:

$$DTLM = \frac{\Delta T - \Delta t}{\ln \frac{\Delta T}{\Delta t}}$$

$$DTLM = \frac{(T_2 - t_2) - (T_0 - t_1)}{\ln \frac{(T_2 - t_2)}{(T_0 - t_1)}}$$

$$DTLM = \frac{(105 - 45) - (25 - 16)}{\ln \frac{(105 - 45)}{(25 - 16)}}$$

$$DTLM = 27^\circ C$$

IV.13. Calcul de la surface d'échange

Cette surface d'échange A est donnée par l'expression suivante :

$$A = \frac{Q_{total}}{U.DTLM}$$

$$A = \frac{45\,000}{680 \times 27}$$

$$A = 2.45 \text{ m}^2$$

Tableau XXX: Surface d'échange de l'aérocondenseur en fonction des débits de vapeur.

Me (l/jour)	800	1600
P (Kwatts)	0.1675	0.335
A (m ²)	1.225	2.45

V. Economie d'eau réalisée par l'utilisation d'un aérocondenseur

V.1. Détermination des différentes quantités de chaleur échangées

Comme pour l'aérocondenseur, la condensation de l'eau se fait en trois étapes :

- La désurchauffe de l'eau de 105 °C à 100 °C ;
- La condensation à température constante 100 °C ;
- Le refroidissement du condensât de 100 °C à 25 °C.

V.1.1. Détermination de la quantité de chaleur nécessaire pour la désurchauffe de l'eau

$$Q_1 = Me \times Cp_{e-vap} \times [T_2 - T_1]$$

V.1.2. Calcul de la quantité de chaleur nécessaire pour la condensation l'eau

La chaleur de vaporisation de l'eau à 100 °C et sous la pression atmosphérique est donné dans la figure, cette valeur correspond à $\Delta H_{vap} = 2501J / g = 597cal/g$.

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

V.1.3. Calcul de la quantité de chaleur nécessaire pour le refroidissement de l'eau

$$Q_3 = Me \times Cp_{e-liq} \times [T_1 - T_0]$$

V.1.4. Quantité de chaleur totale nécessaire

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{total} = 145.7 + 39832 + 5000$$

$$Q_{total} = 45\ 000\ kcal / h$$

$$Q_{total} = Me_{refroidissement} \times Cp_{e-liq} \times (t_2 - t_1)$$

V.2. Températures d'entrée et de sortie des fluides

Nous définissons les températures d'entrée et de sortie des fluides circulant à contre courant comme suit :

Pour la vapeur d'eau :

$$T_2 = 105^\circ C$$

$$T_1 = 100^\circ C$$

$$T_0 = 25^\circ C$$

Pour l'eau de refroidissement : $t_1 = 16^\circ C$

V.3. Détermination du débit d'eau de refroidissement nécessaire

$$Me_{\text{refroidissement}} = \frac{Q_{\text{total}}}{Cp_{e\text{-liq}} \times (t_2 - t_1)}$$

On suppose une température de sortie de l'eau égale à la température de sortie de l'air dans le cas de l'aérocondenseur $t_2 = 45^\circ\text{C}$.

$$Me_{\text{refroidissement}} = \frac{45\,000}{1.0014 \times (45 - 16)}$$

$$Me_{\text{refroidissement}} = 1550\text{kg} / h$$

Tableau XXXI: économie d'eau en fonction des débits de vapeur.

A (m ²)	1.225	2.45
$Me_{\text{refroidissement}}$ (l/h)	775	1550
Economie d'eau (litres/an)	6 789 000	13 578 000

NOMENCLATURE

Nom	description	Unité
ρ_1	Masse volumique de l'eau	Kg/m^3
ρ_2	Masse volumique de l'huile	Kg/m^3
V	volume	m^3
\vec{F}_1	Force résultante du poids de la gouttelette et la poussée d'Archimède	N
\vec{F}_2	Force résultante des forces de frottement qui tendent à s'opposer au déplacement de la gouttelette	N
Re	Nombre de Reynolds	-
v	Vitesse d'ascension des gouttelettes	m/s
d_g	Diamètre de gouttelette	m
d_{min}	Diamètre minimum de gouttelette	m
g	Accélération de la pesanteur	m/s^2
π	Nombre pi	rad
ζ	Coefficient de résistance	-
η	Viscosité dynamique	Kg/ms
G_v	Débit volumique	m^3/s
T_s	Temps nécessaire à la décantation	s
H, l, L	Dimensions de la cuve	m
S	Surface de la cuve	m^2
Ar	Nombre d'Archimède	-
Re	Nombre de Reynolds	-
a, b, c, d	Coefficients de corrélation	-

Dimensionnement du décanteur

I. 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 [6].

Nous avons tenté de tracer, dans cette partie, l'évolution de cette vitesse en fonction du diamètre des gouttelettes pour différentes huiles essentielles.

La vitesse 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.

I.1. Forces agissantes 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.

La phase continue (eau) est caractérisée par :

- Sa masse volumique ρ_1 ;
- Sa viscosité dynamique η ;

La phase dispersée (huile essentielle) est caractérisée par :

- Sa masse volumique : ρ_2 ;
- Son volume V ;
- La dimension des gouttelettes ;

Une gouttelette est soumise :

- A une force F_1 qui est la résultante de la force de pesanteur et de la poussée d'Archimède.
- $\vec{F}_1 = v \times (\rho_1 - \rho_2) \times \vec{g}$
- A une force \vec{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.



La force de résistance \vec{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_s de la gouttelette qui est la vitesse avec laquelle elle atteint la surface de séparation [7].

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 :

$$Re = \frac{\rho \times V \times D}{\eta}$$

Suivant le nombre de Reynolds, on distingue les régimes suivants :

- Régime brownien :

Pour $Re < 10^{-4}$: Le diamètre des gouttelettes est trop petit, car les gouttelettes sont trop fines.

- Régime laminaire :

$10^{-4} \leq Re < 2$; La vitesse d'ascension des gouttelettes s'écrit :

$$v = \frac{d^2(\rho_1 - \rho_2) \times g}{18 \times \eta}$$

- Régime intermédiaire :

$2 \leq Re < 500$; La vitesse d'ascension des gouttelettes s'écrit :

$$v = \frac{Re \times \eta}{d \times \rho_1}$$

Régime turbulent :

$Re > 500$; La vitesse d'ascension s'écrit :

$$v = \sqrt{\frac{3 \times d \times (\rho_1 - \rho_2) \times g}{\rho_1}}$$

$$v = \frac{d^2(\rho_1 - \rho_2) \times g}{18 \times \eta} \quad \Rightarrow \quad d_{\min} = \sqrt{\frac{18 \times \eta \times v}{(\rho_1 - \rho_2) \times g}}$$

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 » [1].

I.2. Vitesse d'ascension de la gouttelette pour une faible concentration d'huile

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 [10].

En appelant ρ_2 et ρ_1 les masses volumiques respectives de la phase lourde et de la phase légère et d_g du diamètre de la particule la condition d'équilibre s'écrit :

$$\frac{1}{6} \pi g d_g^3 (\rho_2 - \rho_1) = \frac{1}{4} \frac{\xi v^2}{2} \rho_1 \pi d_g^2$$

Où ξ est le coefficient de résistance.

Cette relation permet de calculer la vitesse de sédimentation v :

$$v = \left[\frac{4g d_g (\rho_2 - \rho_1)}{3\xi \rho_1} \right]^{1/2}$$

A condition de connaître ξ qui dépend toujours du nombre de Reynolds défini par ailleurs par :

$$\text{Re} = \frac{\rho_1 v d_g}{\mu}$$

Il est possible de déterminer le régime d'écoulement à partir du poids apparent qui est à l'origine du mouvement, le véritable moteur étant la différence $(\rho_2 - \rho_1)$ des masses volumiques.

On introduit alors un nombre adimensionnel indépendant de la vitesse appelé nombre d'Archimède :

$$\text{Ar} = \frac{d_g^3 g (\rho_2 - \rho_1) \rho_1}{\mu^2}$$

Ce nombre traduit le rapport entre les forces de gravité et les forces de frottement visqueux, à partir de sa valeur, qui définit un régime de chute, on déduit le nombre de Reynolds et par suite la vitesse de sédimentation v [1].

I.3. Viscosités et densités de différentes huiles essentielles

Le tableau suivant représente les valeurs de densité et de viscosités de quelques huiles essentielles utilisées dans nos prochains calculs :

Tableau XXXII: Densité et Viscosité de quelques huiles essentielles [17, 34].

Huiles essentielles	Viscosité à 20°C (<i>mPa.s</i>)	Densité (<i>g / cm³</i>)
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.4.Représentation de la vitesse d'ascension de la gouttelette d'huile essentielle

I.4.1. Régime laminaire

Dans le domaine $Ar < 30$, $Re = Ar/18$

Correspond aux faibles valeurs de Re pour lesquelles $\xi = 24/Re$

En portant cette valeur dans la relation (2) et en remplaçant Re par son expression fonction de v , on exprime la vitesse de chute libre sous la forme de la loi de Stokes :

$$v = \frac{d_g^2 g (\rho_2 - \rho_1)}{18\mu}$$

L'évolution de la vitesse en fonction du diamètre de gouttelettes est représenté sur la figure suivante pour différentes huiles essentielles :

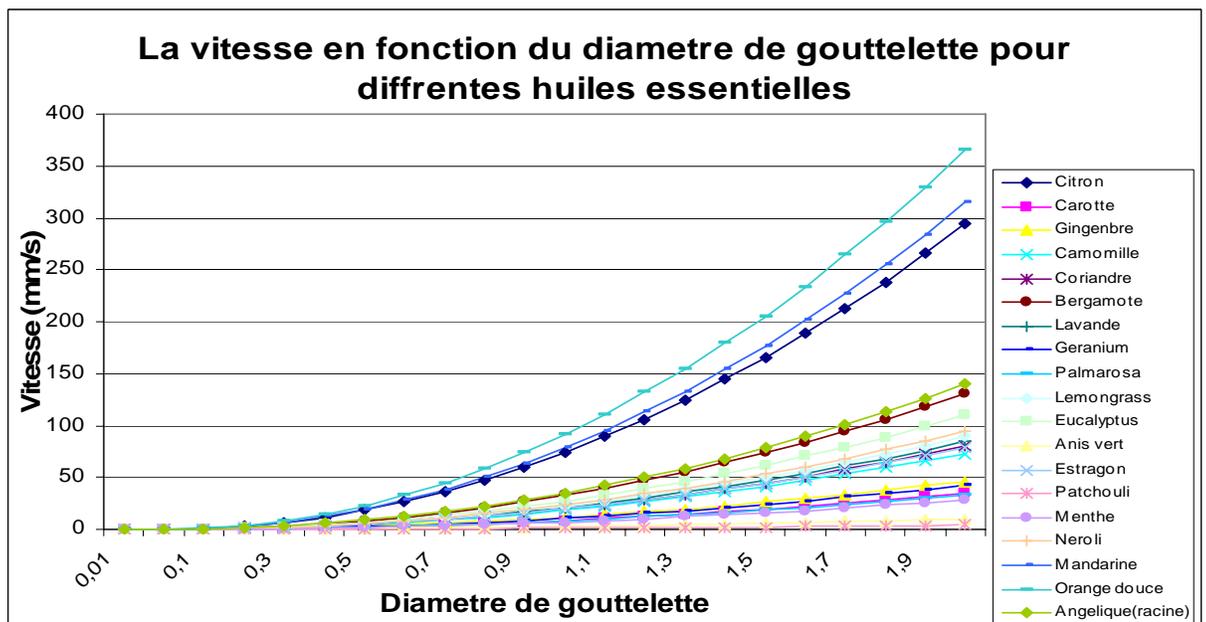


Figure 24: Evolution de la vitesse d'ascension d'une gouttelette en fonction de son diamètre pour différentes huiles essentielles, en régime laminaire.

I.4.1.1. Interprétation de graphe

Les courbes des différentes huiles essentielles ont la même allure générale, en effet les courbes sont 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.

Par contre, 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.

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.

I.4.1.2. Corrélations pour les différentes huiles essentielles

La corrélation générale est de la forme suivante :

$$y = ax^2 - bx + c$$

$$R^2 = 1$$

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

Tableau XXXIII: Coefficients de corrélation pour les différentes huiles essentielles, en régime laminaire.

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

I.4.2. Régime intermédiaire

Dans le domaine $30 < Ar < 100\ 000$, $Re = 1.732 Ar^{0.714}$

Ce domaine correspond à des nombre de Reynolds $1.7 < Re < 600$

La vitesse de chute s'obtient simplement à partir de la définition de Re :

$$v = Re \frac{\mu}{\rho_1 d_g}$$

L'évolution de la vitesse en fonction du diamètre de gouttelettes est représenté sur la figure suivante pour différentes huiles essentielles :

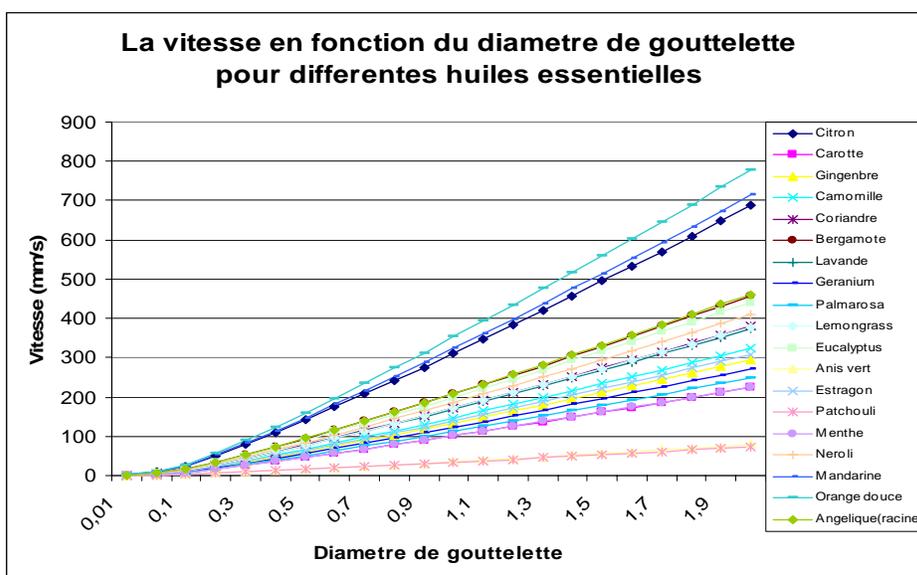


Figure 25: Evolution de la vitesse d'ascension d'une gouttelette en fonction de son diamètre pour différentes huiles essentielles, en régime intermédiaire.

I.4.2.1. Interprétation du graphe

Les courbes des différentes huiles essentielles ont la même allure générale, en effet les courbes sont d'allures croissantes. 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.

I.4.2.2. Corrélations pour les différentes huiles essentielles

La corrélation générale est de la forme suivante :

$$y = ax^2 + bx - c$$

$$R^2 = 0.999$$

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

Tableau XXXIV: Coefficients de corrélation pour les différentes huiles essentielles, en régime intermédiaire.

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

I.4.3. Régime turbulent

I.3 Dans le domaine $100\ 000 < Ar < 10^{11}$, $Re = 1.732Ar^{1/2}$

Dans ce domaine, Re varie de 500 à 500 000. Le coefficient de résistance est à peu près constant :

$\xi = 0.45$ et la vitesse de chute est égale à (loi de Newton) :

$$v = \left[\frac{3gd_g(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_i} \right]^{1/2}$$

L'évolution de la vitesse en fonction du diamètre de gouttelettes est représenté sur la figure suivante pour différentes huiles essentielles :

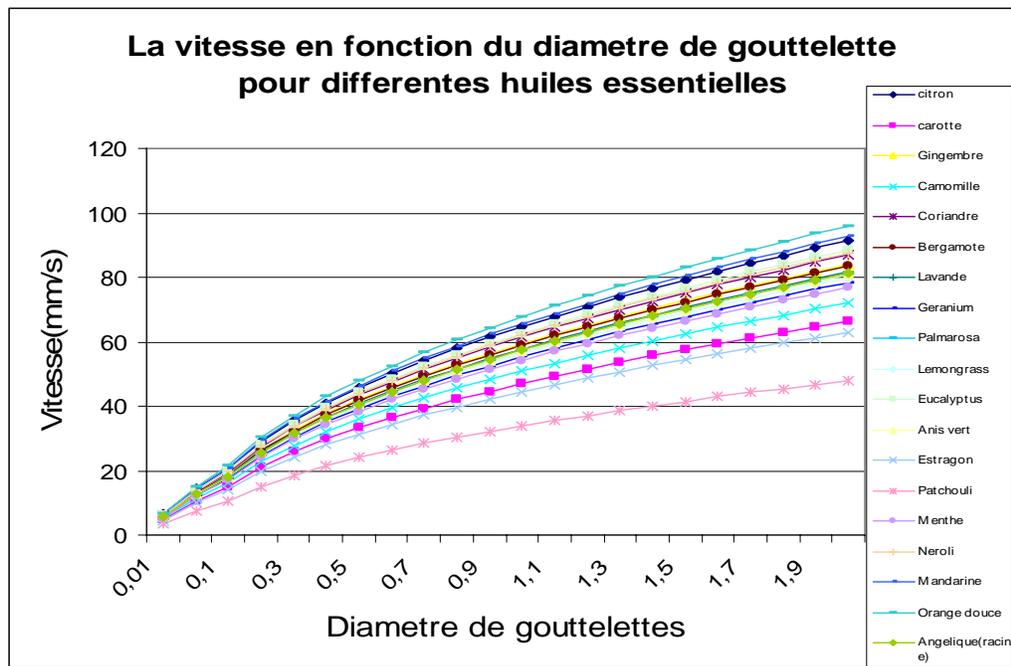


Figure 26: Evolution de la vitesse d'ascension d'une gouttelette en fonction de son diamètre pour différentes huiles essentielles, en régime transitoire.

I.4.3.1. Interprétation du graphe

Les courbes des différentes huiles essentielles ont la même allure générale, en effet les courbes sont d'allures croissantes.

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.

I.4.3.2. Corrélation générale pour les différentes huiles essentielles

La corrélation générale est de la forme suivante :

$$y = ax^3 - bx^2 + cx - d$$

$$R^2 = 0.9997$$

Les coefficients de corrélation obtenus sont regroupés dans le tableau qui suit :

Tableau XXXV: Coefficients de corrélation pour les différentes huiles essentielles, en régime transitoire.

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

En Résumé :

La vitesse d'ascension d'une gouttelette dans un décanteur augmente avec la différence de masse volumique eau huile essentielle, l'accélération de la pesanteur g , le diamètre de la gouttelette.

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

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.

II. Vitesse d'ascension en fonction de la densité, viscosité et du diamètre de la gouttelette d'huile essentielle

Pour cette deuxième partie, nous avons tracé des abaques représentant la vitesse d'ascension de la gouttelette, son diamètre et la viscosité de l'huile essentielle en utilisant le logiciel MATLAB 7.0. L'algorithme obtenu figure en Annexe1. Pour cela, nous avons choisis des domaines de variation comme suit :

- 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 $[0.01 ; 2] \text{ mm}$.

Nous avons alors trois domaines. Nous considérerons que celle du régime laminaire et du régime intermédiaire.

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

II.1. Régime laminaire

L'abaque représenté dans la figure 27 représente la vitesse d'ascension de la gouttelette en fonction de son diamètre, de la viscosité ainsi que la densité de l'huile essentielle pour le régime laminaire.

II.2. Régime intermédiaire

L'abaque représenté dans la figure 28 représente la vitesse d'ascension de la gouttelette en fonction de son diamètre, de la viscosité ainsi que la densité de l'huile essentielle pour le régime intermédiaire.

La Vitesse en fonction du Diametre et de la Viscosité pour différentes densités

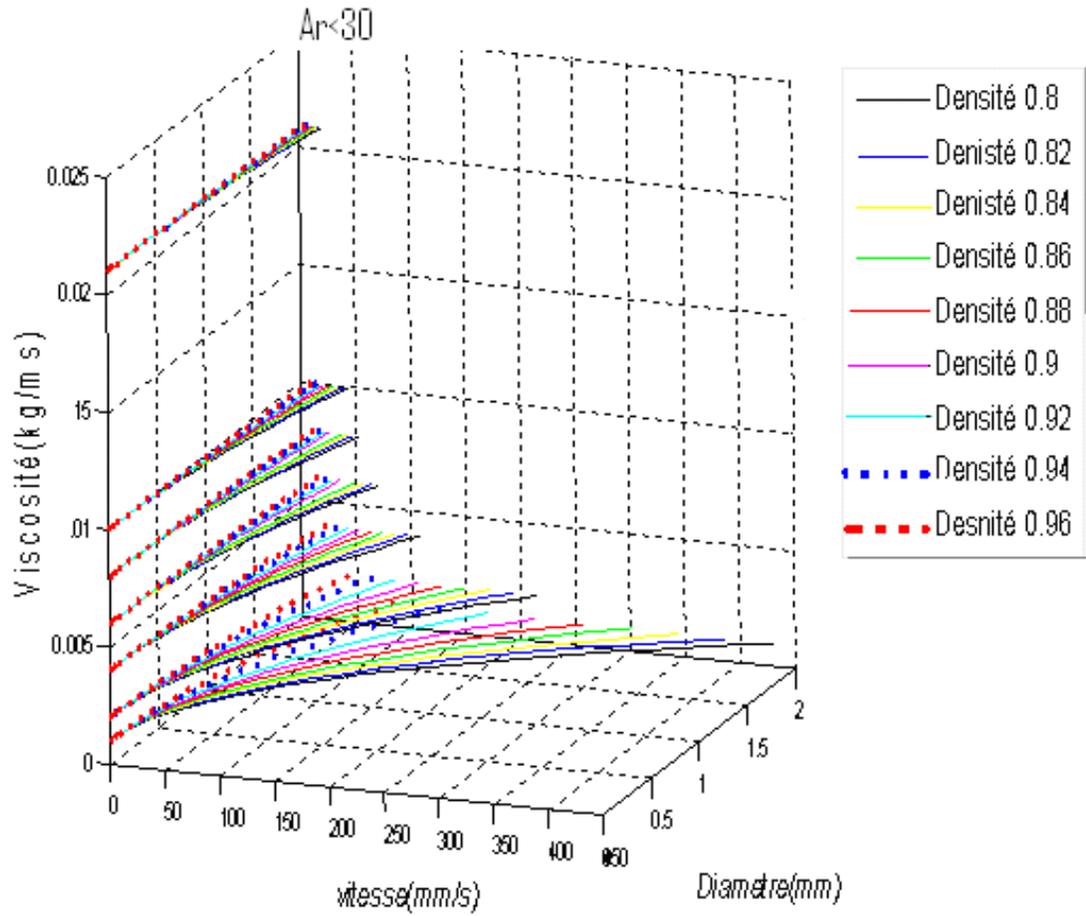


Figure 27: Evolution de la vitesse en fonction du diamètre de gouttelettes, de la viscosité de l'huile essentielle pour différentes densités en régime laminaire.

La Vitesse en fonction du Diametre et de la Viscosité pour différentes densités
 $30 < Ar < 100\ 000$

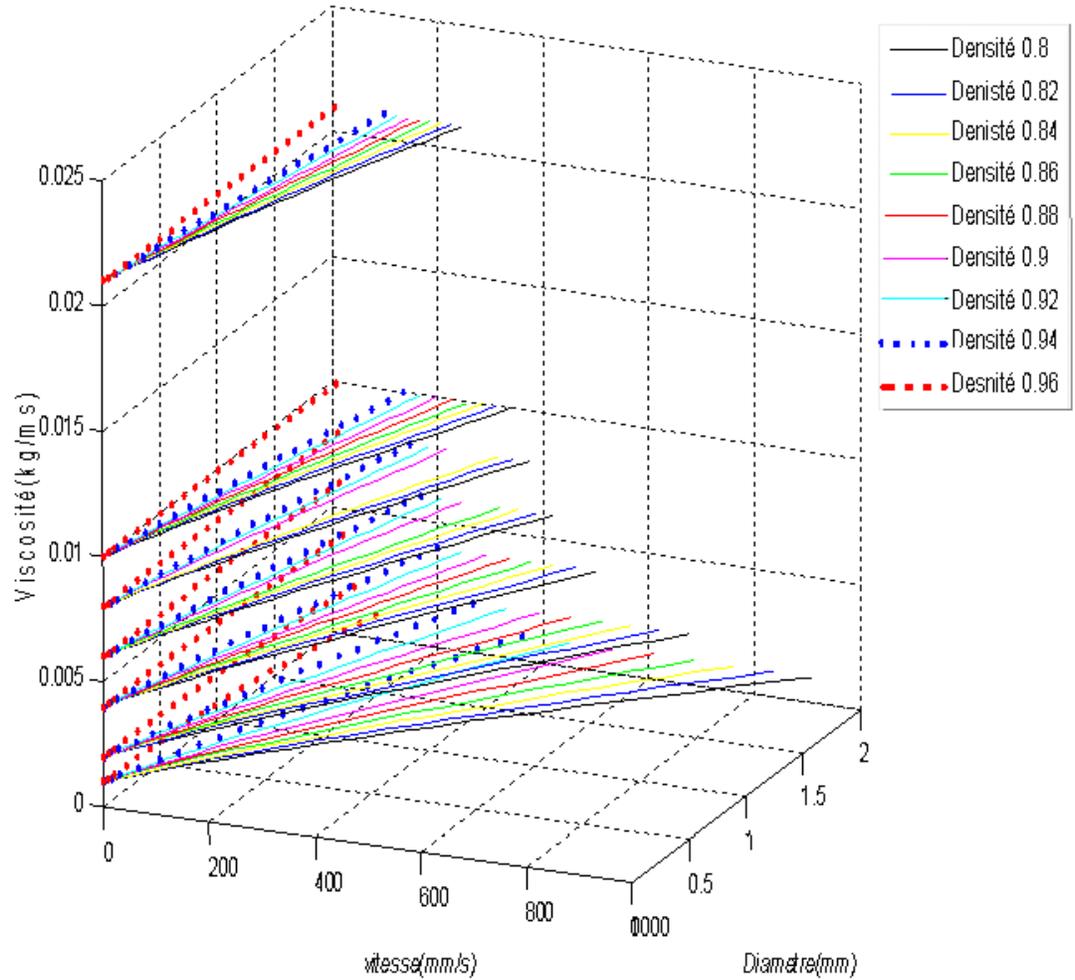


Figure 28: Evolution de la vitesse en fonction du diamètre de gouttelettes, de la viscosité de l'huile essentielle pour différentes densités en régime intermédiaire.

III. 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.

On peut calculer le débit maximal que l'on peut passer dans un appareil si on fixe le diamètre de la gouttelette la plus fine que l'on veut séparer « particule limite » [1].

$$t_s = \frac{V}{G_v} = \frac{LH}{G_v}$$

D'autre part nous avons la relation de vitesse qui donne le temps en fonction de la vitesse et de la distance parcourue par la gouttelette [1].

$$t = \frac{H}{v}$$

$$\frac{LH}{G_v} = \frac{H}{v}$$

$$G_v = \frac{LH}{v} = \frac{S}{v}$$

$$\frac{V}{H} = \frac{G_v}{v}$$

Cette relation dépend finalement de la vitesse et du débit volumique d

'eau à l'entrée. Il suffit donc de donner des valeurs de débit et de lire sur les abaques présentés précédemment la vitesse en fonction du diamètre de la gouttelette, de la viscosité et de la densité

de l'huile considérée et à l'aide de la relation $\frac{V}{H} = \frac{G_v}{v}$ précédente on obtient le rapport Volume

décanteur /hauteur décanteur.

Partie III

Etude technico-économique et environnement

- 1- Estimation du coût total de l'installation**
- 2- Economie sur la facture énergétique**
- 3- Amortissement de l'investissement par économie d'énergie**
- 4- Environnement**

NOMENCLATURE

Nom	description	Unité
H_B	Hauteur brûleur	m
L_B	Largeur brûleur	m
D_{silo}	Diamètre silo	m
H_{silo}	Hauteur silo	m
V_{silo}	Volume silo	m^3
D_E	Hauteur extracteur	m
H_E	Largeur extracteur	m
e_E	Epaisseur de la virole	mm
C	Coefficient de coût	-
Fe	Facteur correctif d'épaisseur des tubes	-
Fp	Facteur correctif de pression	-
F_l	Facteur correctif de longueur des tubes	-
F_n	Facteur correctif / nombre de rangées	-
F_m	Facteur correctif / matériau employé	-
$D_{decanteur}$	Diamètre décanteur	m
$H_{decanteur}$	Hauteur décanteur	m
$V_{decanteur}$	Volume décanteur	m^3

Estimation du coût total de l'installation

Le coût total de l'installation comporte le prix de chacun des différents équipements suivants : le Mobilab, une installation solaire, un brûleur biomasse, un silo de stockage, un extracteur, un aérocondenseur et un décanteur. De plus, le coût du montage et des différents instruments utilisés sont pris en compte dans le coût total.

I. Détermination du prix du Mobilab

En tenant compte du prix du planché sur roues en charpente métallique recouvert de bois, du prix des parois en panneaux sandwich, des vitres, des portes ainsi que le prix du plafond pour la surface considérée au préalable, le prix du Mobilab est estimé à 3 000 000 DA.

Prix du Mobilab = 3 000 000 DA.

II. Détermination du prix de l'installation solaire

Nous établirons le coût du chauffe-eau solaire sur la base d'un prix indicatif de 4500 Euro, soit environs 450.000 DA, pour une installation solaire comprenant :

- 1 ballon de 400 litres de caractéristiques suivantes :

Tableau XXXVI: Caractéristiques du ballon de l'installation solaire.

Dimensions du ballon (mm)	800(avec isolation) x 1750
Poids du ballon (kg)	168

- 3 capteurs solaires de 2.32 m² de même dimensions que le capteur solaire considéré dans le chapitre ; (voir tableau)
- 2 échangeurs,
- Un kit hydraulique complet,
- Un vase d'expansion de 18 litres,
- Un régulateur différentiel,
- Des accessoires de connexions [26].

Sachant que le prix moyen d'un capteur varie entre 150 Euro et 300 Euro [33], si on considère le prix du capteur à 200 Euro par m², soit 20 000 DA par m², on obtient les prix des capteurs solaires suivants :

Tableau XXXVII: Prix des capteurs solaires de 2.32 m² selon leur nombre.

Nombre de capteurs solaires	Surface de capteur solaire (m ²)	Prix des capteurs solaires (DA)
	1	20 000
3	6.96	139 200
9	22	440 000

Prix de l'installation non inclus le prix des capteurs solaires = 450 000 – 139 200

Prix de l'installation non inclus le prix des capteurs solaires = 310 800 DA

Prix de l'installation avec les 9 capteurs solaires = 310 800 + 440 000

Prix de l'installation avec les 9 capteurs solaires = 750 800 DA

Prix de l'installation solaire = 751 000 DA.

III. Détermination du prix du brûleur biomasse

Le brûleur proposé par THERMOCABI concepteur de brûleur biomasse peut développer une puissance de 100 kW. Ce produit a été créé pour obtenir des résultats de combustion très élevés. Il peut brûler une grande variété de bio combustible.

Les propriétés de ce brûleur biomasse sont représentées dans le tableau :

Tableau XXXVIII: Caractéristiques du brûleur biomasse.

Puissance minimale (KW)	50
Puissance maximale (KW)	100
H_B (m)	0.325
L_B (m)	0.240
Model	SPL 100

Le prix de ce brûleur est estimé à 6220 Euro, ainsi

Le prix du brûleur biomasse = 622 000 DA.

III. Détermination du prix du silo

Les calculs utilisés pour l'estimation du prix repose sur la méthode de pré-estime proposée par le manuel d'évaluation économique des procédés. La méthode de pré-estime comporte une démarche relative au pré dimensionnement des appareils, notamment à l'aide de graphiques, et

supposent que soient connues ou déterminées par ailleurs leur caractéristiques dimensionnelles principales (diamètre, hauteur, surface, puissance,...) [4].

Dans l'installation que l'on propose le silo est utilisé pour stocker la matière végétale avant d'être traitée. Son prix est déterminé comme pour un récipient de stockage utilisé à pression atmosphérique.

On considère notre silo de forme cylindrique de caractéristiques suivantes :

- De diamètre $D_{silo} = 1m$;
- De hauteur $H_{silo} = 1m$;
- De volume $V_{silo} = 0.80m^3$;
- En Aluminium.

III.1. Etablissement du prix de base

La figure fournit en fonction de la capacité, le prix de base du récipient utilisé à pression atmosphérique.

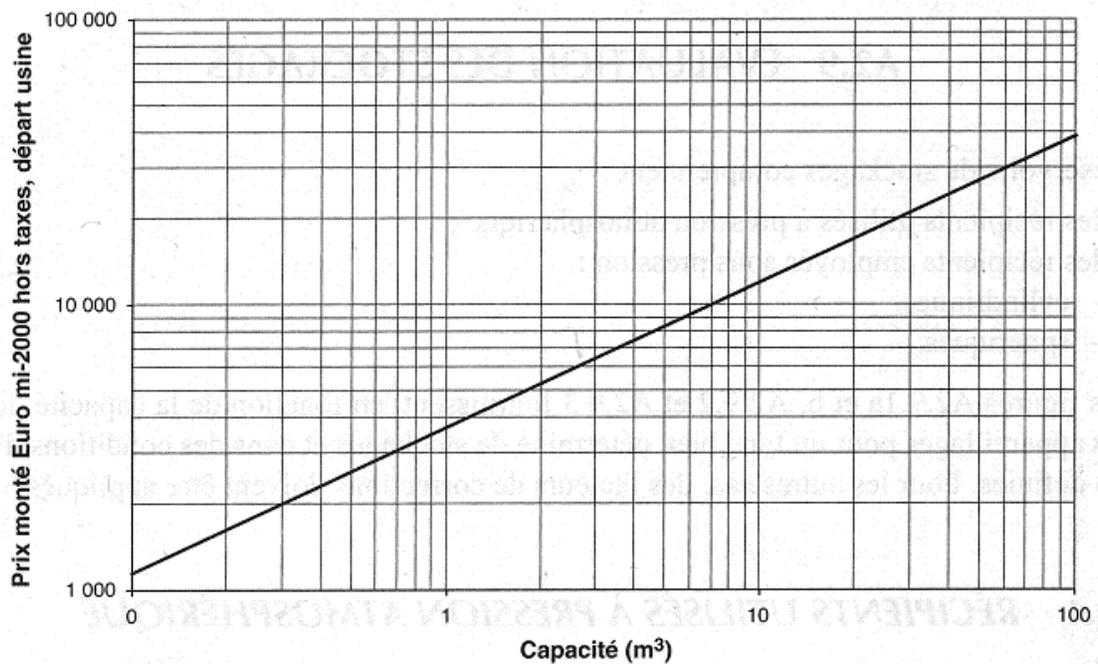


Figure 29: Prix des réservoirs cylindriques à pression atmosphérique [4].

Pour une capacité de $0.80 m^3$, on obtient :

Prix de base (pour l'année 2000) = 3200 Euro

Prix de base (pour l'année 2000) = 320 000 DA.

III.2. Etablissement du prix du silo

Le prix du silo est déterminé par la relation suivante :

Prix du silo (pour l'année 2000) = prix de base* F_m

Avec :

F_m : Facteur de correction relatif au matériau employé. (Voir tableau)

Tableau XXXIX: Influence de la nature du matériau pour les réservoirs d'une capacité inférieure à 10 m³ (pression atmosphérique) [4].

Matériau	F_m
Acier au carbone	1,00
Aluminium	1,40
Revêtement caoutchouc	1,50
Revêtement plomb	1,55
Acier inoxydable	3,20
Acier vitrifié	3,25

Pour l'aluminium, $F_m = 1.40$:

Prix du silo (pour l'année 2000) = 448 000 DA.

On suppose une augmentation du coût d'une installation à environs 3% par an, ce qui reviendrait à une augmentation de 24% de 2000 à 2008.

Prix du silo = 555 600 DA.

IV. Détermination du prix de l'extracteur

Comme pour le silo, les calculs utilisés pour l'estimation du prix repose sur la méthode de pré-estime proposée par le manuel d'évaluation économique des procédés [4].

Pour pouvoir calculer le prix de l'extracteur de notre installation, on assimilera l'extracteur à un ballon. La détermination du prix correspondant s'effectue selon un mode de calcul adopté pour les récipients sous pression.

La méthode consiste à déterminer en fonction du poids et du matériau utilisé le prix de la virole constituant l'extracteur.

Suivant l'épaisseur de la virole et des fonds, il peut être plus économique d'utiliser :

- Un acier homogène (ordinaire ou inox) : épaisseur inférieure à 8 mm ;
- Un acier ordinaire plaqué : épaisseur comprise entre 8 et 20 mm ;
- Un acier revêtement sur acier ordinaire ou chemisage : épaisseur supérieure à 20 mm.

On considère pour nos calculs :

- Une virole d'acier ordinaire d'épaisseur $e_E = 8$ mm ;
- Un diamètre $D_E = 1.10$ m ;
- Une hauteur d'extracteur (ballon) $H_E = 1.90$ m ;
- Un volume d'extracteur (ballon) de 1.80 m³.

IV.1. Détermination du poids de la virole

On utilise l'expression suivante :

$$\text{Poids virole (kg)} = 24.7 \times D_E \times H_E \times e_E$$

$$\text{Poids virole} = 413 \text{ Kg}$$

IV.2. 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 en fonction du diamètre (mm) de la virole, pour une épaisseur de 8 mm et pour de l'acier ordinaire.

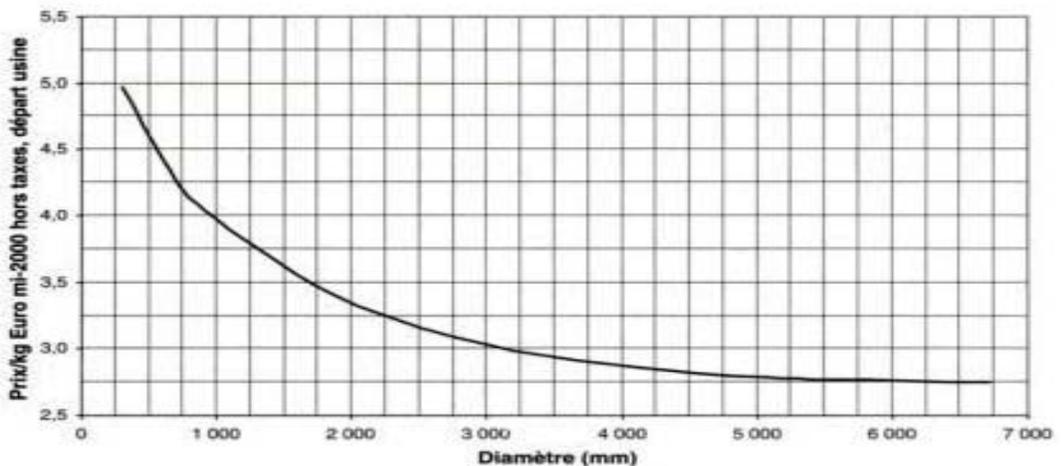


Figure 30: Détermination du prix de base de la virole (pour un récipient sous pression) [4].

On obtient pour $D_E = 1.1 \text{ m} \approx 1100 \text{ mm}$:

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

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

IV.3. Détermination du prix de l'extracteur

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

Prix de l'extracteur (pour l'année 2000) = 1601 Euro

Prix de l'extracteur (pour l'année 2000) = 160 100 DA

On suppose une augmentation du coût d'une installation à environs 3% par an, ce qui reviendrait à une augmentation de 24% de 2000 à 2008.

Prix extracteur = 200 000 DA.

V. Détermination du prix de l'aérocondenseur

Comme pour le silo et l'extracteur, les calculs utilisés pour l'estimation du prix repose sur la méthode de pré-estime proposée par le manuel d'évaluation économique des procédés [4].

V.1. Etablissement du prix de base

Le prix de base est établit pour les conditions suivantes :

- Tubes : longueur 10m, diamètre extérieur 25.5mm, matériau acier ordinaire, épaisseur correspondant à 12BWG, ailettes en aluminium de type « G » (Tubes à rainures avec sertissage des ailettes), nombre de rangées 6 ;
- Pression de service : <10 bars ;
- Boite de retour : type couvercle, en acier ordinaire ;
- Inclinaison des pales du ventilateur réglable manuellement ;
- Moteur d'entraînement type TEFC (Total enclosed fan cooled : étanche, refroidissement à l'air), avec courroies en V.

On détermine tout d'abord le coefficient de coût C à l'aide de la figure, connaissant R et r.

Le prix de base en Euro, hors taxes, départ usine, est donné par l'expression suivante :

Prix de base (pour l'année 2000) = $0.35 * C * S$

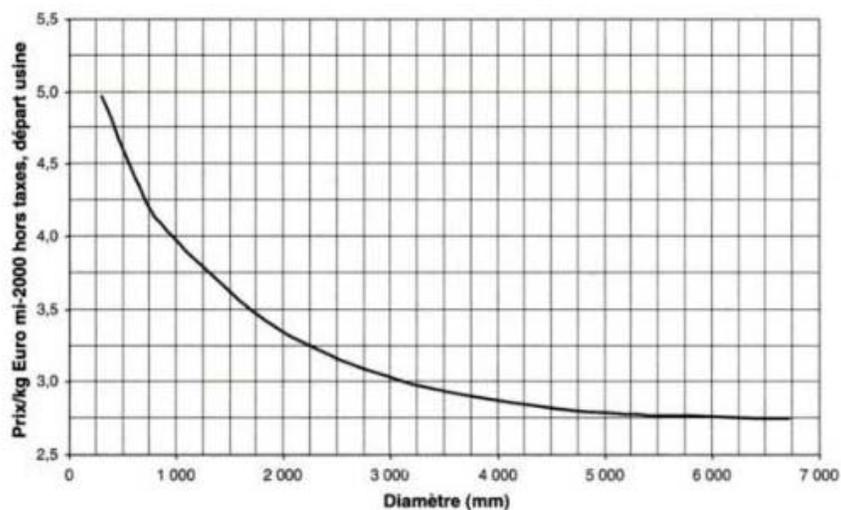


Figure 31: Détermination du coefficient de coût C en fonction de r et R pour les aérocondenseurs [4].

D'après le graphe :

Pour $R=0.89$ et $r=0.00036$: $C= 4500$.

Pour $S=0.51$ Kcal/h°C:

Prix de base (pour l'année 2000)= $0.35*4500*0.51$

Prix de base (pour l'année 2000)= 803.25 Euro.

Prix de base (pour l'année 2000)= 80 325 DA.

Tableau XXXX: Prix de base d'un aérocondenseur pour l'année 2000.

Me (l/jour)	800	1600
S (Kcal/h°C)	0,255	0,51
Prix de base 2000 (euro)	401.625	803.25
Prix de base 2000 (DA)	40 162.5	80 325

V.2. Détermination du prix de l'aérocondenseur

Selon les caractéristiques techniques de l'aérocondenseur considéré, on est amené à multiplier le prix de base par un ou plusieurs des facteurs correctifs figurants dans le tableau.

On a ainsi :

$$\text{Prix de l'aérocondenseur} = \text{prix de base} \times F_e \times F_p \times F_l \times F_n \times F_m$$

Avec :

F_e : Facteur correctif d'épaisseur des tubes,

F_p : Facteur correctif de pression,

F_l : Facteur correctif de longueur des tubes,

F_n : Facteur correctif suivant le nombre de rangées,

F_m : Facteur correctif suivant la nature du matériau employé.

Pour les facteurs correctifs suivants reportés sur le tableau suivant :

Tableau XXXXI: Facteurs correctifs choisis pour la détermination du prix de l'aérocondenseur [4].

F_e	1.00
F_p	1.00
F_1	1.15
F_n	1.25
F_m	1.00

On trouve :

Tableau XXXXII: Prix de l'aérocondenseur pour l'année 2000.

Me (l/jour)	800	1600
S (Kcal/h°C)	0,255	0,51
Prix de l'aérocondenseur pour l'année 2000 (DA)	57 750	115 500

On suppose une augmentation du coût d'une installation à environs 3% par an, ce qui reviendrait à une augmentation de 24% de 2000 à 2008.

Tableau XXXXIII: Prix de l'aérocondenseur.

Me (l/jour)	800	1600
Prix de l'aérocondenseur (DA)	71 610	143 300

Tableau XXXXIV: Facteurs correctifs de prix des aérocondenseurs [4].

A : Influence de l'épaisseur des tubes

Epaisseur des tubes (mm)	BWG	F_e
2.77	12	1.0
2.11	14	0.9
1.65	16	0.8
1.24	18	0.7

B : Influence de la pression

Pression (bar)	F_p
<10	1.00
10 à 20	1.03
20 à 30	1.06
30 à 50	1.10
50 à 75	1.13
75 à 100	1.15
100 à 150	1.20

C : Influence de la longueur des tubes

Longueur des tubes (m)	F_l
12	0.90
10	1.00
8	1.05
6	1.12
5	1.15

D : Influence du nombre de rangées

Nombre de rangées	F_n
3	1.25
4	1.15
5	1.05
6	1.00
8	0.90
10	0.85

E : Influence de la nature du matériau employé

Matériau des tubes (ailettes en aluminium)	F_m
Acier ordinaire	1.00
Aluminium	1.20
Laiton d'aluminium	1.15
Inox 304	1.60
Inox 321	1.65
Inox 316	1.75

VI. Détermination du prix du décanteur

Nous prenons un décanteur de forme cylindrique, de dimensions représentées sur le tableau suivant :

Tableau XXXXV: Dimensions du décanteur de l'installation.

$D_{decanteur}$ (m)	0.7
$H_{decanteur}$ (m)	0.8
$V_{decanteur}$ (m ³)	0.31

Comme il n'y a pas eu d'études sur l'estimation du prix du décanteur, nous nous sommes basés sur les prix existants sur le marché fournis par les fabricants.

Le prix de ce décanteur est estimé à 500 euro soit 50 000 Dinars Algériens.

Prix du décanteur = 50 000 DA

VII. Détermination du coût total de l'installation

On considère pour ce calcul que le montage représente 15% du prix total des différents équipements et l'instrumentation (balance, manomètres, débitmètres,...) représente quant à elle 10% du prix total.

.Pour Me=800 l/jour

Tableau XXXXVI: Décomposition du coût total de revient pour un débit de vapeur 800l/jour.

	Coût de revient en DA
Mobilab	3 000 000
Installation solaire	751 000
Brûleur biomasse	622 000
Silo	448 000
Extracteur	200 000
Aérocondenseur	71 610
Décanteur	50 000
Montage	771 392
Instrumentation	514 261
Total	6 428 263

Pour Me=1600 l/jour

Tableau XXXXVII: Décomposition du coût total de revient pour un débit de vapeur 1600l/jour.

	Coût de revient en DA
Mobilab	3 000 000
Installation solaire	751 000
Brûleur biomasse	622 000
Silo	448 000
Extracteur	200 000
Aérocondenseur	143 300
Décanteur	50 000
Montage	782 145
Instrumentation	521 430
Total	6 517 875

Economies sur la facture énergétique

Notre installation permet de faire des économies sur la facture énergétique.

Le prix du kilowattheure en Algérie, pour les industriels, varie entre 1,48 DA et 2,15 DA, selon le niveau de consommation [32].

Les économies sur la facture énergétique se calcul selon la relation suivante :

$$\text{Les économies sur la facture énergétique} = \text{Le prix du kilowattheure} \times \text{Apport énergétique annuelle fourni par la biomasse et le solaire}$$

Les résultats obtenus pour un prix moyen du kilowattheure de 1.815 DA, sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau XXXXVIII: Économies sur la facture énergétique.

Masse de matière végétale (Kg)	Débit volumique (l/j)	Apport énergétique journalier solaire et biomasse (kWh/j)	Apport énergétique annuel solaire et biomasse (kWh/an)	Economies sur la facture énergétique (DA)
800	800	3596.06	1 312 561,9	2 382 300
	1600	3607.54	1 316 752,1	2 389 905
1000	800	4485.06	1 637 047,0	2 971 240
	1600	4496.54	1 641 237,1	2 978 845

Amortissement de l'investissement par économie d'énergie

Le coût total d'investissement calculé précédemment est égal à :

Nombre d'années pour l'amortissement de l'investissement

$$= \frac{\text{Le cout total d'investissement}}{\text{Economies sur la facture énergétique}}$$

Les résultats du nombre d'années pour l'amortissement de l'investissement par économie d'énergie pour les différents débits de vapeur et les différentes masses végétales sont donnés par le tableau suivant :

Tableau XXXIX: Nombre d'années pour l'amortissement de l'investissement par économie d'énergie.

Masse de matière végétale (Kg)	Débit volumique (l/j)	Economies sur la facture énergétique (DA)	Nombre d'années pour l'amortissement de l'investissement
800	800	2 382 300	2.70
	1600	2 389 905	2.73
1000	800	2 971 240	2.16
	1600	2 978 845	2.19

Environnement

Pour cela, nous avons estimé les quantités de CO₂ et NO_x qui auraient été émises si nous avions utilisé de l'électricité pour produire la même quantité d'énergie que nous a fourni notre installation solaire.

Les émissions dues à la production d'électricité à partir de gaz sont données dans le tableau suivant :

Tableau XXXXX: Émissions de CO₂ et de NO_x dues à la production d'électricité [35].

Emissions de CO ₂ (g/kWh)	900
Emissions de NO _x (g/kWh)	0.2

Ainsi, les émissions de CO₂ et de NO_x évitées sont calculées à partir des relations suivantes :

Les émissions de CO₂ évitées = Apport énergétique solaire annuel × Emissions de CO₂ par kWh

Les émissions de NO_x évitées = Apport énergétique solaire annuel × Emissions de NO_x par kWh

Les résultats obtenus pour les émissions de CO₂ et de NO_x évitées sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau XXXXXI: Émissions évitées de CO₂ et de NO_x en fonction des débits de vapeur.

Masse de matière végétale (Kg)	Débit volumique (l/j)	Apport énergétique solaire journalier (kWh/j)	Apport énergétique solaire annuel en (kWh/j)	Emissions de CO ₂ évitées (g)	Emissions de NO _x évitées (g)
800	800	41,06	14 986,9	13 488 210	2 997,38
	1600	52,54	19 177,1	17 259 390	3 835,42
1000	800	41,06	14 986,9	13 488 210	2 997,38
	1600	52,54	19 177,1	17 259 390	3 835,42

Conclusion

Conclusion

L'étude entreprise s'inscrit dans le cadre du développement durable respectueux de l'environnement. En effet, l'ingénieur en génie des procédés devra prendre en charge et développer des technologies très économes en énergie et en eau.

Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à une activité de moyenne industrie, en l'occurrence celle de la production des huiles essentielles. Cette dernière, sans nécessiter d'investissements considérables permet de générer beaucoup de valeur ajoutée. Elle est, par conséquent, créatrice de richesse, d'emplois directs et indirects et contribue de plus au développement et à la diversification de l'agriculture.

Dans la première partie de ce mémoire, nous avons jugé utile de présenter des rappels sur les huiles essentielles végétales, les procédés d'obtention de celles-ci ainsi qu'une présentation les sources d'énergies renouvelables qui ont été utilisées dans notre projet, en l'occurrence, le solaire et la biomasse.

Dans la deuxième partie, nous présentons l'installation que nous avons réalisée.

Nous avons ensuite évalué le potentiel d'intégration de deux sources d'énergies renouvelables (solaire et biomasse) dans notre procédé.

Les résultats obtenus paraissent très encourageant et montrent que selon les paramètres opératoires l'unité peut être autonome en énergie.

Une des opérations du procédé existantes consiste en la condensation des vapeurs chargées en huiles essentielles dans un échangeur utilisant l'eau comme fluide froid.

Nous avons montré que le fait de remplacer cet échangeur de chaleur classique par un aérocondenseur répondait à notre objectif à savoir la production de distillat à 25°C, et sans utiliser d'eau.

Par ailleurs nous avons évalué le coût d'investissement pour la réalisation d'une telle installation à environ 7 millions de Dinars Algériens.

Notant que cette dépense peut être compensée en 3 années environ par les économies d'énergie moyennant la technologie que nous proposons.

Notre objectif initial était d'utiliser toutes les sources d'énergie renouvelables disponibles (la biomasse et l'énergie solaire) pour les substituer aux énergies fossiles dans la partie du procédé très énergivore à savoir la production de vapeur. Ainsi nous avons préconisé des panneaux solaires thermiques. Les résultats obtenus ont montré que la biomasse était suffisante pour répondre à ce besoin énergétique. Il était dès lors intéressant de penser au solaire photovoltaïque

pour produire l'électricité nécessaire au fonctionnement de l'aérocondenseur en alimentant son ventilateur électrique. La prise en charge de cet aspect peut faire l'objet de travaux futurs.

En conclusion, nous pouvons dire que notre étude a donné les résultats annuels suivants :

- Economie en eau : 6 789 000 litre/an ;
- Economie sur la facture énergétique : 2 400 000 DA/an ;
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre :
Dioxyde de carbone CO₂: 13 500 kg/an ;
Oxydes d'azote NO_x : 3 kg/an ;
- Réduction de rejets solides : 7000 tonne/an.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Koller E., 2001 – Aide Mémoire Génie Chimique. Dunod, Paris, France, 457 p.
- [2] Baud P., 1951 – Traité de chimie industrielle: Industries organiques (Tome III). Masson & Cie, Paris, France, 713 p.
- [3] Bocchio E., 1985 – "Natural essentials oils", Parfums Cosmét. Arômes, 63 p.
- [4] Chauvel A., Fournier G. et Raimbault C., 2001 – Manuel d'évaluation économique des procédés, Editions TECHNIP, Paris, France, 488 p.
- [5] Perry H. et Chilton H., 1973 – Chemical Engineers Handbook: Fluid Flow, Heat Transfer and Mass Transfer (Volume 1). Mc Graw-Hill, New-York, Etats Unis, 1973 p.
- [6] Perry H. et Chilton H., 1967 – Chemical Engineers Handbook: Particle Technology and Separation Processes (Volume 2). Mc Graw-Hill, New York, Etats Unis, 1680 p.
- [7] Perry H. et Chilton H., 1984 – Chemical Engineers Handbook: Particle Technology and Separation Processes (Volume 6). Mc Graw-Hill, New-York, Etats Unis, 1697 p.
- [8] Dumortier D., 2006 – Contribution à l'amélioration de la qualité de l'huile essentielle d'ylang-ylang (*Cananga odorata* (Lamarck) J.D. Hooker et Thomson, variété *genuina*) des Comores. Mémoire de fin d'études. Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Gembloux, France, 94 p.
- [9] Guenther E., 1972 – The Essential Oils : History-origin in plants production analysis. Krieger, Miami, Etats Unis, p.
- [10] Leybros J. et Fremeaux P., 1993 – Extraction solide liquide. Techniques de l'ingénieur, Dossier n° J2780.
- [11] Marchio D. et Morisot O., 2002 - Modélisation simplifiée d'un aéroréfrigérant. Cahier des algorithmes. Ecole des Mines de Paris, Paris, France.
- [12] Riou A. et Depauw J.P., 1990 – Différents types de chaudières industrielles. Techniques de l'ingénieur, Dossier n° b1480.
- [13] Tifaoui F. et Si Mehend M., 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.
- [14] Trambouze P., Van Landeghem H., et Wauquier J.P., 1984 – Les réacteurs chimiques. Editions Technip, Paris, France, 639 p.

- [15] Trambouze P., 1999 – Matériels et équipements. Editions Technip, Paris, France, 778 p.
- [16] Vidal J., 1973 – Thermodynamique méthodes appliquées au raffinage et au génie chimique. Éditions Technip, Paris, France, 386 p.
- [17] Georgiev E. et Stoyanova A., 2000 – Handbook du spécialiste de l'industrie des arômes. UFT Academic Publishing House, Plovdiv, Bulgarie, p. 561.
- [18] International Energy Agency, 2001 - World Energy Outlook, Paris, France, 596p.
- [19] www.afnor.fr
- [20] www.cea.fr (Commissariat à l'Énergie Atomique)
- [21] www.edqm.eu (Pharmacopée Européenne)
- [22] www.essentialoil.com
- [23] www.herbarom-laboratoire.com
- [24] www.itebe.org (Institut des bioénergies)
- [25] www.kenergie.com
- [26] www.leroymerlin.fr
- [27] www.mem-algeria.org (Ministère des énergies et des mines Algérie)
- [28] www.outilssolaires.com
- [29] www.phyto.aromathérapie.fr
- [30] www.sciencedirect.com
- [31] www.scopus.com
- [32] www.sonelgaz.dz
- [33] www.sunergic.ch
- [34] www.techniques-ingenieur.fr
- [35] www.tecsol.fr
- [36] www.mkmbioenergia.hu

Annexes

Annexe 1 : Algorithme d'établissement des abaques des figures 27 et 28 (dimensionnement d'un décanteur) :

Algorithme

```
%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