

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique  
Département de Génie Chimique  
Laboratoire de valorisation des énergies fossiles

## Mémoire de Magister

En : Génie Chimique

Option : Génie Chimique

Présenté par :

**Mademoiselle Abir BOUMAHAMMED**

Ingénieur d'Etat en Génie Chimique de l'ENP.

### Intitulé

**Conception, modélisation et optimisation d'un  
aérocondenseur pour l'extraction des huiles essentielles.**

**Rapporteur : Monsieur El-Hadi BENYOUSSEF**    Professeur    ENP

Soutenu publiquement le 06 Décembre 2012, devant le jury :

Mme R. Derriche  
Mr E-H. Benyoussef  
Mme A. Mefti  
Mr Slatniya

Professeur à l'ENP  
Professeur à l'ENP  
Chargée de cours à l'ENP  
Professeur à l'ENP

Président  
Rapporteur.  
Examineur  
Examineur

ENP 2012

Ecole Nationale Polytechnique (ENP)

10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP, 182, 16200, El Harrach, Alger, Algérie

[www.enp.edu.dz](http://www.enp.edu.dz)

*Les gens ont des étoiles qui ne sont pas les mêmes. Pour les uns qui voyagent, ces étoiles sont des guides. Pour d'autres, elles ne sont rien que de petites lumières. Pour d'autres, qui sont savants elles sont des problèmes.... Mais toutes ces étoiles-là se taisent. Toi, tu auras une étoile comme personne n'en a.....*

*Antoine de Saint-Exupéry*

*Le Petit Prince.*

## **REMERCIEMENTS**

*D'abord je remercie le bon Dieu ; tout puissant , qui m'a donné la foi et la volonté d'arriver à ce stade , sans lui je n'aurais pu acquérir tout ce savoir .*

*Je ne saurai exprimer ma profonde gratitude à Monsieur E-H. Benyoussef, Professeur à l'ENP, pour m'avoir proposé ce sujet, et pour ses précieux conseils et encouragements.*

*C'est avec un grand plaisir que j'exprime mes sincères remerciements à Madame Derriche, Professeur à l'ENP, de m'avoir honorée d'accepter de présider le jury.*

*Je remercie vivement les membres de jury qui ont accepté de m'accorder de leur temps pour juger et apporter leurs critiques constructives à ce travail : Mme A. Mefti, chargée de cours à l'ENP, et Monsieur Slatniya, Professeur à l'ENP.*

*Cette étude n'aurait pas été possible sans le soutien de mes parents et de ma famille, qu'ils trouvent ici un « Merci » particulier.*

*Enfin, je tiens à exprimer ma vive reconnaissance à toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail .*

## عنوان تصميم مكثف هوائي لاستخراج الزيوت الأساسية باستعمال نظام المحاكاة

### ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تفعيل جزء من وحدة لاستخلاص الزيوت الأساسية و هي المكثف. اقترحنا استعمال مكثف هوائي يتكون من مروحة و أنبوب ملفوف و موصول بالألواح الشمسية لتحقيق الاكتفاء الطاقوي.

باستعمال نظام المحاكاة و بتطوير نظام حل معادلات تمكنا من تحديد خصائص المكثف. في مرحلة ثانية استعملنا نظام آخر لدراسة الألواح الشمسية.

في النهاية الدراسة الاقتصادية و البيئية تسمح بالقول أن المشروع منتج و مريح على أكثر من صعيد.

**كلمات مفتاحيه-** استخلاص الزيوت الأساسية- طاقات متجددة - الطاقة الشمسية الضوئية- مكثف هوائي

**Titre :** Conception, modélisation et optimisation d'un aérocondenseur pour l'extraction des huiles essentielles.

### Résumé :

Le but de cette étude est d'optimiser une partie d'une unité d'extraction mobile, qui est le condenseur. Pour Assurer l'autonomie énergétique de cet équipement et réduire les besoins en eau ; nous avons proposé d'utiliser un aérocondenseur alimenté par l'énergie solaire photovoltaïque. Cet aérocondenseur est constitué d'un (ou de plusieurs) ventilateurs et d'un serpentin en acier inoxydable. L'utilisation du logiciel Hysys et le développement d'un programme de calcul, permet d'avoir le bilan énergétique et la configuration finale de l'aérocondenseur. Dans une deuxième partie, le logiciel PV-GIS est utilisé pour dimensionner les panneaux solaires.

Enfin; l'étude économique et environnementale permet de conclure que cet investissement est porteur tout en respectant le principe des trois E : Energie, Eau et Environnement.

**Mots clés :** Extraction d'huiles essentielles - Energies renouvelables –Solaire photovoltaïque – aérocondensation.

**Title:** Design, modeling and optimization of an air condenser for extraction of essential oils.

### Abstract:

The purpose of this study is to optimize one part of a mobile extraction unit, which is the condenser. To ensure the energy independence of this equipment and reduce water needs, we proposed to use an air condenser powered by photovoltaic solar energy. This air condenser consists of a (or more) fans and a stainless steel coil. Using the software Hysys and development of a computer program, allows us to have the energy balance and the final configuration of the air condenser. In the second part, the PV-GIS software is used to size the solar panels.

Finally, the economic and environmental study prove that this investment is promoter and respects the three E's: Energy, Water and Environment

**Key Words:** Renewable Energies- Extraction of essential oils- Air Condenser- Photovoltaic panel.

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1</b> : Critères de classement des échangeurs de chaleur	<b>4</b>
<b>Tableau I.2</b> : Comparaison aéroréfrigérant- réfrigérant à eau	<b>9</b>
<b>Tableau I.3</b> : Comparaison tirage induit-tirage forcé	<b>11</b>
<b>Tableau I.4</b> : Géométrie de la cellule de référence	<b>15</b>
<b>Tableau I.5</b> : Les résistances de film interne, et de l'encrassement [ $h$ $m^2$ °C/Kcal]	<b>16</b>
<b>Tableau I.6</b> : Relation entre la vitesse faciale, la résistance de film extérieur et le nombre de rangées.	<b>16</b>
<b>Tableau I.7</b> : Principales applications des huiles essentielles	<b>24</b>
<b>Tableau I.8</b> : Evolution des importations des huiles essentielles en Algérie	<b>25</b>
<b>Tableau II.1</b> : Variables d'entrée et de sortie pour Hysys.	<b>35</b>
<b>Tableau II.2</b> : Les conditions de dimensions en 1ère alternative	<b>41</b>
<b>Tableau II.3</b> : Les conditions de dimensions en 2ème alternative	<b>42</b>
<b>Tableau II.4</b> : Les caractéristiques de ventilateur choisi pour chaque Mobilab	<b>45</b>
<b>Tableau II.5</b> : La chaleur échangée par chaque Mobilab en Kcal/h.	<b>46</b>
<b>Tableau II.6</b> : Matrice des expériences et résultats	<b>47</b>
<b>Tableau II.7</b> : Effets et interactions des facteurs (Réponse= D2).	<b>48</b>
<b>Tableau II.8</b> : Effets et interactions des facteurs (Réponse= UA).	<b>50</b>
<b>Tableau II.9</b> : Effets et interactions des facteurs (Réponse= D2) ; modèle 2 <sup>nd</sup> degrés.	<b>51</b>
<b>Tableau II.10</b> : Effets et interactions des facteurs (Réponse= UA) ; modèle 2 <sup>nd</sup> degrés.	<b>52</b>
<b>Tableau II.11</b> : L'irradiation solaire mensuelle sur la ville d'Alger.	<b>55</b>
<b>Tableau II.12</b> : L'électricité produite (par surface unitaire du système à installer).	<b>56</b>

<b>Tableau II.13</b> : Besoin journalier en énergie et surface nécessaire des panneaux photovoltaïques de chaque Mobilab.	<b>57</b>
<b>Tableau II.14</b> : La surface exploitable pour chaque Mobilab	<b>58</b>
<b>Tableau II.15</b> : Contribution mensuelle de l'énergie solaire pour le recouvrement de la consommation des ventilateurs	<b>59</b>
<b>Tableau II.16</b> : Estimation du coût de l'aérocondenseur.	<b>61</b>
<b>Tableau II.17</b> : Estimation du coût du système photovoltaïque.	<b>61</b>
<b>Tableau II.18</b> : Estimation du coût du container.	<b>62</b>
<b>Tableau II.19</b> : Estimation du coût du décanteur	<b>62</b>
<b>Tableau II.20</b> : Estimation du coût des caissons.	<b>62</b>
<b>Tableau II.21</b> : Estimation du coût de la tuyauterie et l'instrumentation.	<b>63</b>
<b>Tableau II.22</b> : Estimation du coût total de l'unité d'extraction mobile	<b>63</b>
<b>Tableau II.23</b> : Coût d'utilités.	<b>64</b>
<b>Tableau II.24</b> : Estimation du coût de la matière première	<b>64</b>
<b>Tableau II.25</b> : Estimation des frais de la main d'œuvre.	<b>64</b>
<b>Tableau II.26</b> : Estimation des frais financiers.	<b>65</b>
<b>Tableau II.27</b> : L'amortissement.	<b>65</b>
<b>Tableau II.28</b> : Calcul de l'amortissement.	<b>66</b>
<b>Tableau II.29</b> : Le coût opératoire	<b>66</b>
<b>Tableau II.30</b> : La production annuelle des huiles essentielles.	<b>67</b>
<b>Tableau II.31</b> : Comparaison des trois Mobilab	<b>67</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1</b> : Principe de calcul thermique d'un échangeur	5
<b>Figure I.2</b> : L'irradiation directe journalière reçue sur plan normal au mois de Décembre.	29
<b>Figure I.3</b> : Découpage typique des frais opératoires	35
<b>Figure II.1</b> : Choix du système d'unité (a)	35
<b>Figure II.1</b> : Choix du système d'unité (b)	36
<b>Figure II.2</b> : Création de « fluid package »	36
<b>Figure II.3</b> : Choix des composés de procédés	37
<b>Figure II.4</b> : Caractéristiques du courant d'entrée	37
<b>Figure II.5</b> : Caractéristiques du courant de sortie	38
<b>Figure II.6</b> : La simulation de l'aérocondenseur	38
<b>Figure II.7</b> : la variation de la résistance de film extérieur en fonction de la vitesse faciale	39
<b>Figure II.8</b> : L'aérocondenseur.	40
<b>Figure II.9</b> : Disposition des ventilateurs ; variante 1.	41
<b>Figure II.10</b> : Disposition des ventilateurs ; variante 2.	42
<b>Figure II.11</b> : Illustration du tableau II.7 : comparaison entre les paramètres.	48
<b>Figure II.12</b> : Signification de l'interaction $a_{12}$	49
<b>Figure II.13</b> : Illustration du tableau II.8 : comparaison entre les paramètres.	50
<b>Figure II.14</b> : les erreurs relatives à l'application du modèle de 2 <sup>nd</sup> degrés (réponse =D <sub>2</sub> )	52

<b>Figure II.15</b> : les erreurs relatives à l'application du modèle de 2 <sup>nd</sup> degrés (réponse =UA)	<b>53</b>
<b>Figure II.16</b> : Choix de la ville d'Alger sur l'interface de PV-GIS.	<b>55</b>
<b>Figure II.17</b> : Le coefficient de coût ; méthode de pré-estime	<b>60</b>



## INTRODUCTION :

L'industrie des huiles essentielles est devenue une industrie d'une grande importance. Les huiles essentielles sont des produits à forte valeur ajoutée, et dont le marché connaît un saut majeur. C'est pourquoi, beaucoup de pays se sont orientés vers leur production et leur valorisation.

L'Algérie avec ces ressources naturelles pourrait devenir un des plus grands producteurs et exportateurs des huiles essentielles au monde notamment celles spécifiques au bassin méditerranéen. Cependant, elle ne contient que quelques unités traditionnelles de production des huiles essentielles ne pouvant pas satisfaire les demandes en ces produits.

Au laboratoire de valorisation des énergies fossiles de l'Ecole Nationale Polytechnique, et dans le cadre des travaux de recherche de l'équipe de valorisation des espèces végétales ; plusieurs études d'extraction des HE ont été menées. Le travail suivant est une contribution à l'étude d'un aérocondenseur faisant partie d'une unité d'extraction mobile, baptisée Mobilab. L'unité initiale contenait un condenseur à eau, nous étudions la possibilité de son remplacement par un aérocondenseur alimenté par des panneaux photovoltaïques

Notre étude est composée d'une partie théorique et d'une partie pratique.

La partie théorique commence par nous rappeler les principes de transfert de chaleur avec changement de phase et les principes de dimensionnement des aérocondenseurs.

Ensuite, nous faisons un aperçu sur les huiles essentielles, leur définition, leur composition, et les différents modes de leur obtention.

Après, nous présentons l'énergie solaire et des modules photovoltaïques.

Enfin, nous finissons cette partie par une introduction aux méthodes de calcul économique.

La pratique commence par le dimensionnement de l'aérocondenseur, pour cela nous avons utilisé le logiciel Hysys de simulation.

Une fois les valeurs numériques sont récupérées de Hysys, un programme de calcul Excel est établi afin de résoudre le système des équations et pouvoir choisir l'aérocondenseur adéquat pour chaque Mobilab. Une base de données regroupera les résultats de Hysys et d'Excel.

Une fois cela est fait, nous passons à l'étape de dimensionnement de kit photovoltaïque. Le logiciel PV-GIS est utilisé lors de cette étape. Ayant introduit les caractéristiques du module à utiliser, le logiciel PV-GIS, nous donnera la surface nécessaire du module nécessaire pour couvrir le besoin en énergie de l'aérocondenseur. Notons que le besoin en énergie est calculé par le programme Excel.

Pour finir notre étude, une étude économique est menée afin de montrer la possibilité de la concrétisation de notre système en pratique. Cette étude comporte une estimation du coût de projet et du délai de sa récupération.

# PARTIE THEORIQUE

## ABREVIATIONS

### Partie A:

<b>A</b>	Surface d'échange d'une cellule.	[m <sup>2</sup> ]
<b>C<sub>2</sub></b>	Capacité thermique massique de l'air	[J/Kg.K]
<b>D</b>	Diamètre de ventilateur	[m].
<b>DTLM</b>	différence Logarithmique moyenne des températures (en contre-courant)	
<b>F</b>	Facteur correctif de DTLM.	
<b>H<sub>1</sub></b>	Enthalpie massique de la vapeur saturée	[J/Kg].
<b>H<sub>2</sub></b>	Enthalpie massique de condensat (condensation isotherme)	[J/Kg].
<b>M<sub>1</sub></b>	Débit massique du fluide à condenser (la vapeur d'eau)	[Kg/s].
<b>N</b>	Nombre de ventilateurs	
<b>N<sub>c</sub></b>	Nombre de cellules requises	
<b>NTU</b>	Nombre des unités de transfert.	
<b>P<sub>mot</sub></b>	Puissance de moteur	[W].
<b>P<sub>t</sub></b>	Pression totale	[N/m <sup>2</sup> ].
<b>P<sub>vent</sub></b>	Puissance de ventilateur	[W].
<b>Q</b>	La chaleur totale échangée lors de la condensation	[W].
<b>S<sub>v</sub></b>	Section Transversale	[m <sup>2</sup> ]
<b>T<sub>1</sub></b>	Température d'entrée de fluide à condenser (vapeur d'eau)	[°C].
<b>T<sub>2</sub></b>	Température de sortie de condensat (Eau liquide);	[°C].
<b>U</b>	Coefficient de transmission thermique global	[Kcal/h. m <sup>2</sup> .°C] ou [W/m <sup>2</sup> K].
<b>V<sub>2</sub></b>	Débit volumique de l'air	[m <sup>3</sup> /s].
<b>m<sub>2</sub></b>	Débit massique de l'air	[Kg/s].
<b>q</b>	la chaleur échangée par une cellule de référence	[W].
<b>r<sub>a</sub></b>	la résistance de film extérieur	[h.m <sup>2</sup> .°C/ Kcal].
<b>r<sub>d</sub></b>	la résistance de l'encrassement	[h.m <sup>2</sup> .°C/ Kcal].
<b>r<sub>i</sub></b>	la résistance de film interne	[h.m <sup>2</sup> .°C/ Kcal].
<b>r<sub>m</sub></b>	la résistance du métal	[h.m <sup>2</sup> .°C/ Kcal].
<b>t<sub>1</sub></b>	Température d'entrée de l'air	[°C].
<b>t<sub>2</sub></b>	Température de sortie de l'air	[°C].
<b>v<sub>f</sub></b>	vitesse faciale de l'air	[m/s].
<b>x<sub>1</sub></b>	Titre massique en vapeur d'eau	
<b>z</b>	Altitude du site	[m].
<b>η<sub>mot</sub></b>	Rendement de moteur	
<b>η<sub>vent</sub></b>	Rendement de ventilateur	
<b>ρ<sub>air</sub></b>	Masse volumique de l'air	[Kg/M <sup>3</sup> ].

### Partie B:

<b>HE</b>	Huile essentielle.
<b>p.p.m</b>	Partie par million

**T<sub>c</sub>** Température critique d'un fluide [°C]  
**VMHD** Vaccum microwave Hydrodistillation.

**Partie C:**

**A<sub>m</sub>** Atomètre = 10<sup>-18</sup> mètre

**Partie D:**

**C** Coût

**C<sub>E</sub>** Indice de Chemical Engineering

**C<sub>f</sub>** Coût de capital fixe

**C<sub>m</sub>** coût de matériel

**EXW** Incoterm ; Ex Work.

**F<sub>L</sub>** Facteur de Lang

**FOB** Incoterm. Free on board

**M&S** indices de Marshall & Swift.

**n** indice

**S** Capacité de l'installation, de l'équipement.

## ***PARTIE A : LES AEROCONDENSEURS***

---

### **I. LA CONDENSATION :**

Lorsque de la vapeur saturée vient en contact avec une surface ayant une température plus basse, il se produit une condensation [1-3] qui est définie comme étant le changement de phase de l'état vapeur à l'état liquide [3-4]. L'énergie latente de la vapeur est libérée, la chaleur est transférée à la surface et le condensât est formé. L'évacuation de l'enthalpie est assurée par convection et conduction et trois résistances thermiques placées en série doivent être surmontées : la résistance thermique dans la phase vapeur, la résistance thermique à la conversion de la phase vapeur en phase liquide et la résistance thermique dans la phase liquide [2 ; 5].

Dans le cas des surfaces lisses et mouillables, un film se forme ; il s'agit d'une condensation en film. Si la surface est non mouillable à cause de présence de molécules organique par exemple, la condensation sera en gouttes [2 ; 4-5]. Dans d'autres cas, on retrouve la condensation en gouttelettes suspendues dans une phase gazeuse pour former un brouillard ; et la condensation à contact direct qui se produit lorsque la vapeur entre en contact avec un liquide froid (absence de parois) [6].

La condensation en surface peut être une condensation en film ou une condensation en gouttes, selon l'aspect visuel du condensât formé. Cela est dû aux conditions de la mouillabilité de la surface.

#### **I.1 La condensation en film :**

Dans les conditions normales, une couche continue de liquide se forme à la surface et l'écoulement du condensât s'effectue vers le bas sous l'influence de la pesanteur [1]. Mais en pratique, la présence des phénomènes complexes tels que les ondes, l'arrachement des gouttelettes et l'inondation compliquent l'étude de la condensation en film [2 ; 4]. Cependant; quelques approches théoriques ont été développés en adoptant des hypothèses simplificatrices. La théorie de Nusselt est la plus répandue.

#### **I.2 La théorie de Nusselt :**

En 1916, Nusselt a établi les relations théoriques pour le calcul des coefficients d'échange de chaleur dans le cas de la condensation en couche mince de vapeurs pures sur des tubes ou des plaques [1-4 ; 6].

Ses études ont été basées sur les hypothèses suivantes :

- Le film liquide est en écoulement laminaire et ses propriétés sont constantes.
- La vapeur est de composition pure à une température uniforme. Autrement dit, il n'existe pas un gradient de température de vapeur, et la conduction à l'interface liquide-vapeur ne peut avoir lieu, la chaleur ne se transmet que par condensation.

- Les contraintes de cisaillement à l'interface liquide-vapeur sont négligeables :  

$$\frac{\partial y}{\partial x}(z)=0$$
- A travers la couche du condensât, la chaleur est transmise seulement par conduction et la variation de température est linéaire.

Un film continu de liquide s'écoule vers le bas sous l'influence de la pesanteur, et son épaisseur augmente au fur et à mesure que la vapeur se condense à l'interface liquide-vapeur.

### I.3 Condensation en gouttes :

Dans le cas d'une surface contaminée par une substance empêchant le condensat de mouiller la surface, la vapeur se condense en gouttes plutôt qu'en un film continu. Le coefficient d'échange est de quatre à huit fois plus élevé que celui de la condensation en film [4] [5].

## II. LES ECHANGEURS DE CHALEUR : DEFINITION, CLASSEMENT, CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT :

### II. 1 Généralités :

On parle d'appareil échangeur de chaleur si cet échange se fait entre deux fluides séparés par une surface solide. L'échangeur de chaleur est un élément essentiel en industrie, utilisé pour la production de l'énergie, la récupération de la chaleur, le conditionnement de l'air...etc. [6-7].

L'étendue du champ des utilisations des échangeurs explique leur diversité, de ce fait plusieurs critères de classement existent, les principaux sont énumérés dans le tableau suivant : [6 ; 8]

**Tableau I.1** : Critères de classement des échangeurs de chaleur

Technologie	Tubulaire: monotubes, coaxiaux ou multitubulaires ;
	A plaques : à surface primaire ou à surface secondaire ;
	Autres: contact direct, à caloducs ou à lit fluidisé.
Fonctionnel	Écoulement monophasique
	Un fluide a un écoulement avec changement de phase : les évaporateurs et les condenseurs ;
	Les deux fluide changent de phase : les évapocondenseurs ;
Nature des matériaux de la paroi d'échange	Métallique : acier, cuivre, aluminium...etc.
Nature des matériaux de la paroi d'échange	Non métallique : plastique, céramique, verre.
La compacité	C'est le rapport de l'aire de la surface d'échange au volume de l'échangeur. Selon R.K. Shah si cette valeur dépasse $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , l'échangeur est dit compact.

## II. 2 Sélection ; dimensionnement et conception d'un échangeur :

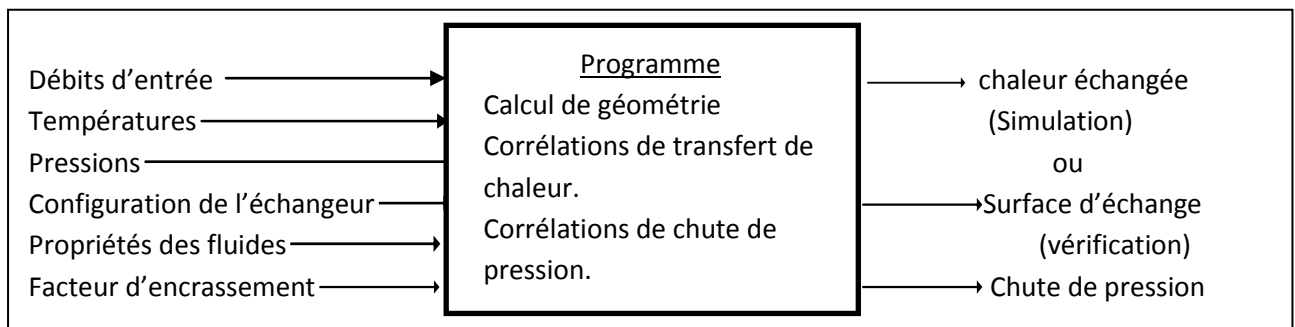
Dans le domaine des échangeurs, il faut distinguer entre la sélection d'un échangeur ; son calcul (dimensionnement) et son design (la conception) [7 ; 9-10].

En premier, l'ingénieur essaye de retrouver parmi les standards existants chez les fournisseurs, un échangeur qui correspond à ses besoins (ou un échangeur surdimensionné quelque fois) ; cela lui permet de gagner sur le coût et le délai de livraison.

Dans d'autres cas plus délicats, l'échangeur sera construit uniquement pour le service demandé.

Le dimensionnement ou le calcul d'un échangeur est un procédé ou un algorithme développé pour déterminer les performances thermiques de l'échangeur. La dualité transfert de chaleur-perte de charge domine tout le problème [9]. En effet, quand la vitesse de circulation augmente (le nombre de Reynolds augmente), les résistances au transfert, et par conséquent, la surface d'échange diminuent. En contrepartie, cela provoque une augmentation de la perte de charge, ce qui conduit à consommer plus d'énergie en utilisant une pompe à pression de refoulement supérieur. En d'autres termes : on gagne sur la surface et on perd sur les frais opératoires ; c'est pourquoi le calcul comportera deux études parallèles : transfert de chaleur et perte de charge [9].

**Figure I.1** : Principe de calcul thermique d'un échangeur [9].



Notons bien que :

- Les données nécessaires: données géométriques, de fonctionnement et propriétés physiques des fluides ;
- La phase thermique proprement dite, comprenant des calculs géométriques (sections de passage des fluides, diamètres hydrauliques, etc.), puis des calculs de transfert de chaleur et de pertes de pression, à l'aide des corrélations.
- Les résultats, sous forme succincte (puissance thermique échangée et pertes de pression) ou sous forme plus détaillée (valeurs locales des coefficients d'échange, nombres adimensionnels caractéristiques, etc.).

Deux modes de calcul existent [7 ; 9]:

- Mode simulation : connaissant la géométrie complète de l'appareil, ainsi que les deux fluides et leurs conditions d'entrée, on désire connaître les conditions de sortie des fluides (température, titre de vapeur), d'où la puissance thermique échangée ;



- Mode vérification : connaissant les deux fluides et la puissance thermique à transférer entre eux, et ayant par expérience, une idée approximative de la géométrie de l'appareil, on cherche à savoir si cet appareil est bien adapté ou non au service demandé. Pour cela, l'algorithme fournit un critère de surdimensionnement (ou de sous-dimensionnement) sous la forme d'un rapport représentant le trop (ou le manque) de surface d'échange pour le service demandé.

Une fois les résultats numériques du calcul sont connus, on passe à l'étape du design pour les vérifier. Par exemple, vérifier que la longueur calculée est inférieure à la longueur maximale permise pour tel type d'échangeur. Si la réponse est négative ; un algorithme itératif permet d'ajuster les paramètres internes ou de changer la configuration de l'échangeur. La convergence vers l'échangeur souhaité peut être plus ou moins rapide. L'intelligence et l'expérience du concepteur interviennent dans cela.

Mais ce n'est pas tout. Le facteur économique, une fois entré en jeu, peut mener des modifications à l'échangeur adapté. De plus, l'échangeur est une unité fonctionnant parmi d'autres ; c'est pourquoi les calculs doivent tenir en considération les équipements auxiliaires (pompes, tuyauteries...).

Le calcul d'un échangeur ne s'arrête pas au dimensionnement thermique, l'ingénieur doit mener un dimensionnement mécanique. Lors de cette phase, est étudiée la partie sous pression des échangeurs et la conception de la charpente métallique. Cette étude est régie par des lois, principalement la réglementation ASME (American Society of Mechanical Engineers) [12-13].

## **II. 3 Les méthodes de dimensionnement :**

### **a. Les méthodes analytiques globales :**

Ces méthodes nécessitent une bonne connaissance pratique des échangeurs dès que l'on s'éloigne des dimensions standards et, de plus, elles sont particulièrement inadaptées en cas d'écoulement diphasique (condenseur et évaporateur) [7 ; 9-10 ; 14]. Elles sont toutes basées sur certaines hypothèses pour permettre une approche intégrale ; de ce fait ; elles ont quelques limites :

- Pour permettre une intégration analytique des équations, elles supposent un coefficient d'échange constant le long de l'échangeur ; (notons toutefois que grâce aux logiciels de calcul, certains cas simples ont été traités analytiquement tout en considérant un coefficient d'échange variable [7])
- Elles n'offrent pas en général la possibilité de dégager l'influence de paramètres géométriques, car les corrélations sont obtenues à partir de résultats globaux sur des appareils standards.

Les ouvrages spécialisés détaillent ces méthodes pour chaque type de configuration des échangeurs. Parmi ces méthodes on peut citer [7] :

- la méthode de DTLM et le facteur correctif F,

- la méthode de P-NTU (facteur de performance-nombres des unités de transfert)
- la méthode de paramètre  $\Theta$ .

#### **b. Les méthodes numériques :**

Comme vu précédemment, les méthodes analytiques considèrent un coefficient d'échange global constant. Les méthodes numériques viennent contourner ce problème, et s'appliquer aux échangeurs de chaleur pour donner des résultats plus précis. Cependant, chaque méthode a ses spécificités et ses limites (Certaines par exemple ne peuvent s'appliquer que sur quelques types d'appareils seulement) [7 ; 9].

Parmi ces méthodes on peut citer [7 ; 9] :

- La méthode des volumes finis
- La méthode du diagramme température-enthalpie ;
- La méthode des réseaux (étude des distributions des écoulements) ;
- Les méthodes thermohydrauliques multidimensionnelles ;

### **III. LES ECHANGEURS DE CHALEUR AVEC CHANGEMENT DE PHASE :**

#### **III.1 Définition :**

L'un des deux fluides peut subir un changement de phase à l'intérieur de l'échangeur. C'est le cas des évaporateurs si le fluide froid passe de l'état liquide à l'état gazeux, ou des condenseurs si le fluide chaud se condense de l'état de vapeur à l'état liquide [9]. Ils peuvent être tubulaires ou à plaques. Dans notre cas, nous nous intéressons aux condenseurs.

#### **III.2 Les condenseurs :**

Le but de ces échangeurs est de condenser une vapeur à l'aide d'un fluide réfrigérant. Ils concernent des secteurs d'activité très variés comme la production d'énergie (centrale thermique), les industries chimiques (colonnes à distillation), les industries du génie climatique, de l'agro-alimentaire, du séchage, etc. Le fluide à condenser est rarement un corps pur, mais le plus souvent une vapeur en présence d'autres gaz incondensables. La condensation de la vapeur saturée est obtenue par échange thermique avec un fluide froid appelé réfrigérant. Ce réfrigérant doit être abondant et bon marché, principalement l'eau et l'air [9].

Si une surface d'échange sépare la vapeur à condenser et le fluide réfrigérant, on parle de condenseur à fluides séparés.

Quand on a affaire à une condensation d'une vapeur (ou une ébullition d'un liquide) dans un échangeur de chaleur, certains facteurs entrent en jeu. En premier, le changement considérable de densité (et autres propriétés de fluide). En second lieu, les deux phases qui sont intimement entremêlées vont aller dans différentes directions et avec différentes vitesses, par effet de gravitation et de chute de pression. Ainsi le problème majeur d'analyse de ce type des échangeurs sera de déterminer les lois déterminant le passage entre phases [7].

En industrie, la condensation en goutte est quasiment inexistante, et le mode de condensation en film est répandu. Dans ce dernier cas, le coefficient d'échange sur la paroi est plus faible, et il dépend de l'épaisseur du film de condensat.

La présence de gaz incondensables engendre une dégradation du coefficient d'échange ; par conséquent ; leur élimination est une des principales méthodes d'intensification de transfert pour ce type d'échangeurs [15].

Parmi les autres méthodes, on peut citer [15] :

- Les tubes cannelés ou corrugués : servant à diminuer l'épaisseur du film de condensat, et à perturber la sous-couche laminaire
- Traitement de surface pour favoriser la condensation en gouttes, applicables principalement en cas de condenseur de vapeur d'eau.

#### **IV. INTRODUCTION A LA TECHNOLOGIE DES AEROREFRIGERANTS/ AEROCONDENSEUR :**

Se débarrasser de la chaleur générée est un problème majeur et fréquent en industrie, pour le résoudre, on a affaire aux appareils de refroidissement. Ces appareils appelés réfrigérants permettent d'évacuer la chaleur contenue dans un fluide chaud en le mettant en contact, direct ou indirect, avec un fluide froid. L'air et l'eau sont les principaux fluides froids utilisés. Si le fluide froid est l'air ambiant l'appareil est appelé aéroréfrigérant [7 ; 16-17].

Un aéroréfrigérant est constitué principalement d'un système de ventilation, un faisceau tubulaire et une chambre (ou des chambres) de distribution d'air. Les aéroréfrigérants sont classés selon :

- La position du faisceau tubulaire: horizontal, vertical ou incliné.
- Le type de ventilation : induit ou forcé.

Il est important de noter que les appareils de réfrigération atmosphérique fonctionnent en général en circuit ouvert compte tenu du fait que l'air chaud est rejeté après échange directement dans l'atmosphère et n'est pas recyclé.

Un aérocondenseur se distingue des aéroréfrigérants par le fait que le fluide à refroidir subit un changement d'état : passage de l'état vapeur à l'état liquide [18].

Lors du dimensionnement, les méthodes appliquées aux aéroréfrigérants peuvent être généralisées sur les aérocondenseurs, c'est pourquoi, le terme « aéroréfrigérant » est utilisé dans cette étude.

Le dimensionnement des aéroréfrigérants été l'objet de beaucoup d'études ; et beaucoup d'ouvrages détaillent les procédures de calcul. Rubin (1960), Lerner (1972), Brown (1978) et Mukherjee (1997) ont étudiés la conception et les applications des aéroréfrigérants [14]. Les coefficients d'échange thermiques sont aussi donnés dans des ouvrages par classement de d'échangeur et par type de fluide.

## V. LE CHOIX ENTRE AERO REFRIGERANT / REFRIGERANT A EAU :

Comme présenté dans l'introduction, une partie de notre travail consiste à proposer une alternative à une partie du système déjà existant [19-20]. Il s'agit d'un aérocondenseur à la place du condenseur à eau. Une brève étude comparative est nécessaire pour justifier le choix préliminaire.

**Tableau I.2 : Comparaison aéroréfrigérant- réfrigérant à eau**

<b>En faveur des réfrigérants à eau</b>	
<b>AEROREFRIGERANT</b>	<b>REFRIGERANT A EAU</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• En raison de sa chaleur spécifique faible et de sa dépendance sur la température sèche, l'air ne peut refroidir un fluide à des températures basses.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'eau peut refroidir un fluide à des températures plus basses que l'air.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ils nécessitent de grandes surfaces à cause du faible coefficient de transfert air-film et la faible chaleur spécifique de l'air.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une surface de transfert compacte moindre, un dimensionnement de l'échangeur bien défini.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les variations saisonnières de la température de l'air peuvent modifier les performances. En hiver, les basses températures peuvent provoquer le gel.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'eau est moins affectée par les variations de températures.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ils ne doivent pas être installés près de gros obstacles tels que les bâtiments, arbres...etc. car la recirculation de l'air pourrait être bloquée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ils peuvent être installés parmi d'autres équipements.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les aéroréfrigérants nécessitent des tubes à ailettes, une technologie spéciale.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une conception bien établie pour un échangeur à calandre multitubulaire est satisfaisante.</li> </ul>

<b>En faveur des aéroréfrigérants</b>	
<b>AEROREFRIGERANT</b>	<b>REFRIGERANT A EAU</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'air est disponible et ne coûte rien.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'eau est généralement rare, et pour l'amener au site, des moyens coûteux sont recommandés : pompes, tuyaux, puits... etc.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• La station d'une usine n'est pas conditionnée par l'installation d'aéroréfrigérants.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pour les grands complexes en particulier, les implantations sont fonction de l'approvisionnement en eau de réfrigération.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'air est rarement corrosif et il n'est donc pas nécessaire de prévoir le nettoyage ou l'encrassement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le danger de contamination de l'eau de réfrigération est présent en cas de réfrigération d'un fluide toxique.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les coûts d'entretien représentent généralement 20 à 30 % de ceux de réfrigération à eau.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les équipements sont plus complexes et l'entretien est plus coûteux. L'eau contient des corps vivants qui grossissent en présence de la chaleur et causent l'encrassement de l'aéroréfrigérant. Un arrêt pour le démontage et le nettoyage est nécessaire à cause des oxydes déposés par certains minéraux tels que le fer.</li> </ul>

Les aéroréfrigérants peuvent être utilisés à chaque fois que l'on veut dissiper une quantité d'énergie qui ne peut être récupérée économiquement, car elle n'est pas à un niveau de température suffisant. Une approche de 6 C entre la température de l'air ambiant et la température de sortie du fluide est un minimum économiquement admissible [7 ; 16]. Une humification préalable de l'air dans des tours humides permet de descendre en dessous de cette approche dans les pays très chauds et très secs.

Les principaux avantages et inconvénients d'un aéroréfrigérant, comparé à ceux d'un réfrigérant à eau sont résumés dans le tableau I.2 [7 ; 16-17].

## **VI. DEFINITION D'UNE CELLULE AEROCONDENSEUR :**

Une cellule aérocondenseur (appelée également baie d'aérocondenseur) est constituée essentiellement [16-18]:

- des faisceaux échangeurs ;
- un collecteur d'alimentation en vapeur;
- un système de ventilateurs mécaniques entraînés par un moteur ;
- d'une transmission réductrice reliant le moteur au ventilateur ;
- des pièces de tôlerie composant le bardage ;
- d'une charpente métallique.
- Un système de control et instruments de mesure (facultatif).

### **VI. 1 Le système de ventilation :**

Deux cas de tirage sont connus pour les aéroréfrigérants : le tirage induit et le tirage forcé ; ainsi ; les ventilateurs peuvent être placés au-dessus ou au-dessous des tubes. En cas de tirage forcé, les ventilateurs sont placés au-dessous des tubes pour souffler l'air (  la température ambiante)   travers ces derniers. Dans le second cas, ils sont placés au-dessus des tubes pour pouvoir rejeter ou décharger l'air chauffé. [16-17 ; 21]. Le tableau I.3 illustre les points de différence entre les deux types de tirage.

Pour assurer des larges volumes même à faibles pressions ; les ventilateurs axiaux sont répandus. Pour garder une bonne distribution de l'air, le ventilateur devra être situé à une distance égale à la moitié de son diamètre, le rapport entre la surface faciale A et la section transversale du ventilateur  $S_v$  doit être observé :

$$1.8 < A / S_v < 2.6$$

La vitesse de l'air avant son entrée dans le faisceau sur toute la surface offerte par le devant du faisceau est dite « vitesse faciale ».

Généralement ; ces ventilateurs sont munis de 4 à 8 pales. Notons que le coût de ventilateur et le débit d'air fourni à une vitesse donnée de ventilateur croit avec le nombre des pales utilisées.

**Tableau I.3 : Comparaison tirage induit-tirage forcé [16-17].**

<b>Tirage induit</b>	<b>Tirage forcé</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moins de recirculation de l'air chaud : car il peut être rejeté à une vitesse de 2 à 2.5 fois celle d'appareils à tirage forcé.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une puissance légèrement faible car le ventilateur est du côté air froid.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meilleure distribution de l'air : car sa vitesse faciale relativement faible lui permet de couvrir uniformément les rangées des tubes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meilleure accessibilité pour l'entretien et la maintenance.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peu d'effet des conditions météorologiques : soleil, pluie et grêle car 60% de la surface faciale est couverte.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Températures de fonctionnement élevées.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le niveau de bruit au sol est moindre.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• possibilité d'amélioration des performances en ajoutant des pavillons.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plus de facilité pour la préfabrication.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une puissance plus grande car le ventilateur est du côté air chaud (densité de l'air plus faible au ventilateur).</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible perte de charge côté air</li> </ul>	

En gardant un volume d'air constant ; la vitesse rotative peut être réduite en augmentant le nombre de pales de ventilateur. Cela a un effet favorable sur l'efficacité et la réduction de la pollution sonore.

Les ventilateurs doivent être solides, fiables et moins coûteux. Leur vitesse de rotation doit être réduite en cas d'augmentation de diamètre pour éviter la pollution sonore causée par la vitesse de pointe élevée. Pour assurer le débit d'air requis, les ventilateurs nécessitent une puissance qui sera fournie par des moteurs électriques, à gaz, à essence, à système hydraulique ou par turbines à vapeur. Quand la température de l'air diminue (température hivernale), la densité de l'air augmente ; c'est pourquoi il faut augmenter la puissance motrice pour que le ventilateur fournisse toujours le même débit volumique d'air. Pour contourner ce problème, l'utilisation des moteurs autovariables est requise [16 ; 22-23].

## **VI. 2 Les faisceaux :**

Les faisceaux sont le cœur où le refroidissement (et le changement d'état de la vapeur vont s'effectuer). Ils sont constitués de :

- Tubes généralement à ailettes ;
- Boîtes de distribution permettant d'introduire le fluide chaud et de récupérer le fluide réfrigéré ou condensé ;
- Un châssis assurant la rigidité ;

Pour une meilleure efficacité, la circulation du fluide doit être à contre courant. L'air froid circulant de bas en haut, l'entrée du produit à refroidir ou à condenser est aménagée du côté de sortie de l'air. [16-17]. Différents systèmes de distribution d'air entre les ventilateurs et les faisceaux existent.

### **VI. 3 Le système de control :**

Dans les grandes installations, le système de control devient efficace et l'utilisation des appareils de mesures indispensables. Ainsi ; plusieurs transmetteurs et interrupteurs de pression, de température, de niveau et de vibration seront placés.

Ces transmetteurs servent à avoir les valeurs de pression et de température à la sortie des faisceaux et les comparer aux valeurs se trouvant sur les diagrammes T-P, pour s'assurer que la condensation a eu lieu. (Figure diagramme T-P) [16-17 ; 21].

## **VII. LES PROBLEMES MAJEURS DES AEROREFRIGERANTS :**

Le problème majeur des aéroréfrigérants est le changement de saison, donc de température. Ce qui peut engendrer un débit d'air plus que le nécessaire, une surconsommation d'énergie et un sur-refroidissement du fluide [16-17 ; 21]. Pour surmonter ce problème on peut jouer sur le débit d'air par :

- Utilisation de plusieurs moteurs ou moteurs autovariables,
- Des variateurs de vitesse,
- Des persiennes sur la face des tubes,
- Réduction de la vitesse de rotation,
- Variation de l'angle des pales de ventilateurs (auto-pitch),

A ce problème, viennent s'ajouter les problèmes suivants :

- Mauvaise distribution du fluide chaud à l'intérieur des tubes : un problème qui s'accroît dans les cas d'écoulement diphasiques (condenseurs).
- Recirculation air chaud : La recirculation d'air chaud engendre une élévation de température d'entrée d'air et une réduction des performances ; c'est pourquoi les études d'implantation doivent prendre en compte les recirculations d'air chaud éventuels, les vents dominants et les obstacles qui font écran à proximité (immeubles, salles de contrôle, structure...).
- La pollution sonore : La principale source de bruit dans les aéroréfrigérants est le système de ventilation (ventilateur, engrenage, moteur) utilisé dans les cas de tirage forcé ;
- Considérations environnementales : L'utilisation de l'air comme ressource n'a aucune conséquence directe sur l'environnement, et n'est pas considérée comme une réelle consommation. En cas de tirage mécanique, le besoin en air est lié au besoin en énergie pour le fonctionnement du ventilateur.

Le refroidissement par air sec consomme davantage d'air que le refroidissement par voie humide.

Dans certaines zones spécifiques (sites industriels très denses), la qualité de l'air peut poser problème, et sa composition peut provoquer la corrosion des tubes (à ailettes) ou serpents, ou entraîner l'encrassement de la surface ; dans les deux cas, l'efficacité de l'échange de chaleur sera affectée. Le pré-nettoyage de l'air de refroidissement semble peu réaliste. Par conséquent, le nettoyage de la surface de l'échangeur de chaleur pourrait s'avérer nécessaire en fonction de la composition chimique de l'air [16-17].

## **VIII. DIMENSIONNEMENT DES AEROCONDENSEURS :**

Comme cité précédemment pour tous les échangeurs de chaleur, plusieurs méthodes existent pour permettre de choisir l'aérocondenseur adapté pour le cas étudié [10 ; 21-23]. Certaines sociétés développent leurs propres méthodes de calculs et logiciels de dimensionnement et de conception [10 ; 24-25] ; dans ce qui suit nous allons présenter quelques unes.

Le principe reste toujours le même : choisir le couple débit d'air/pertes de charge côté air qui définit la puissance électrique nécessaire à l'entraînement des ventilateurs. En d'autres termes, il s'agit de déterminer le meilleur compromis entre l'évacuation de la chaleur du fluide chaud vers l'air ambiant et la perte de charge générée par le passage de l'air entre les tubes des faisceaux.

Le dimensionnement conditionne le choix de certains paramètres qui sont :

- Le diamètre des tubes ;
- Les dimensions des ailettes ;
- Le nombre d'ailettes par mètre de tube ;
- Le pas des tubes dans le faisceau pas des tubes dans le faisceau ;
- Le nombre de rangs ;
- Le nombre de passes ;
- La longueur des tubes ;
- La largeur du faisceau ;
- Le nombre de faisceau par cellule ;
- La taille des équipements mécaniques ;

### **VIII.1 Les données nécessaires au dimensionnement :**

- Le débit vapeur de dimensionnement, le débit vapeur maximal et le débit vapeur minimal ;
- la température ambiante de dimensionnement, la température ambiante minimale et maximale de site ;
- la pression maximale et minimale admissible par la turbine (la turbine est le fournisseur de puissance aux ventilateurs) ;
- la pression à l'entrée du condenseur ;
- l'enthalpie de la vapeur ou le titre massique en vapeur à l'entrée du condenseur ;
- l'élévation du site ;

Dans les installations majeures, d'autres facteurs entrent en considération comme les contraintes d'implantation du site [16-18 ; 21].

### **VIII.2 La température d'entrée de l'air pour la conception :**

La valeur de la température de l'air prise pour le dimensionnement de l'aérocondenseur est d'une grande importance. En effet la différence de température entre le produit et l'air à l'entrée est directement proportionnelle à la surface.



Pour des raisons d'économie ; cette température est non pas prise égale à la température maximale du site, mais à la température de l'air qui n'est pas dépassée pendant 94 % des heures opérationnelles. Cela permet de la réduire de 12 à 14 °C, et de réduire le coût jusqu'à 50%. En cas d'une température d'air relativement élevée, l'humidification de l'air peut servir aussi. Par exemple, si la température de l'air est de 32°C, sa température humide peut varier entre 20 et 24 °C selon son humidité relative. Cependant, il ne faut pas oublier les risques de corrosion causés par l'humidification [10 ; 16 ; 21].

Les stations météorologiques peuvent nous fournir des courbes de variation annuelle de température.

Pour tenir compte des sources de chaleur locales, on peut ajouter quelques degrés à cette température. Notons toutefois, qu'il faut éviter les emplacements d'aéroréfrigérants proche des sources de radiation de chaleur (fours, colonnes .. etc).

### VIII.3 La température de sortie de l'air pour la conception :

Pour éviter tout endommagement, spécialement des ailettes, la température de sortie de l'air ne doit pas dépasser 104°C en cas de tirage induit. Dans les cas de tirage forcé, elle peut aller à 160°C [10].

Le choix de cette température est très important dans l'étude économique. Il influe directement sur la puissance à fournir et par conséquent sur le coût à considérer. En effet, plus cette température augmente, plus la puissance à fournir diminue. Mais au même temps, le coefficient de transfert côté air et le DTLM diminuent, ce qui augmente la taille de l'unité et par conséquent son coût d'investissement total.

### VIII.4 Le choix du couple ventilateur/moteur :

Chaque fournisseur de ventilateurs dispose d'une banque de données des courbes de performances. Ces graphes présentent la relation entre le débit volumique de l'air, la pression statique du ventilateur, sa vitesse et son efficacité. Des logiciels de choix de ventilateurs développés par les fournisseurs existent [10 ; 16].

La puissance à fournir par le ventilateur est donnée par :

$$P_{vent} = \frac{(\Delta P_t)_{vent} V_2}{\eta_{vent}} \quad (I.1)$$

La puissance du moteur doit tenir compte de son efficacité et de l'efficacité d'entraînement. Elle est donnée par la relation suivante :

$$P_{mot} = \frac{P_{vent}}{\eta_{ent}\eta_{mot}} \quad (I.2)$$

Il est recommandé que la puissance du moteur à installer soit augmentée de 10%. [16]

### VIII.5 Dimensionnement thermique d'aérocondenseur à contre courant global :

Durant le dimensionnement thermique, on a recours aux bases des données existantes sur les ouvrages de domaine [10 ; 17 ; 18 ; 21 ; 23]. Pour donner des résultats performants, des méthodes multiples et applicables pour chaque type particulier des aéroréfrigérants

existent. Les logiciels existants sont aussi divers et appliquent des algorithmes différents [10].

Dans ce qui suit, nous allons présenter une méthode simplifiée qui sera utilisée après. Elle consiste à :

- Choisir une cellule aérocondenseur de référence.
- L'évaluation du nombre de cellules aérocondenseur nécessaires à l'échange global,
- le prédimensionnement de la ventilation et la détermination de la grandeur de la puissance électrique consommée pour refroidir le fluide.

**Tableau I.4 : Géométrie de la cellule de référence [17-18].**

TUBE	Matière
	Longueur
	Diamètre
	Coefficient de transmission thermique globale
CELLULE	Largeur (au sol)
	Longueur (au sol)
	Hauteur plate-forme mécanisme
	Hauteur collecteur
	Nombre de faisceaux par cellule
	Nombre de rangs de tubes par faisceau
	Surface d'échange tube nu par cellule
VENTILATEUR	Nombre par cellule
	Diamètre
	Moteur
	Débit d'air

**a. Détermination du coefficient de transmission thermique global :**

Ce coefficient est fonction des différentes résistances thermiques s'opposant au transfert.

$$1/U = r_i + r_d + r_m + r_a \quad (I.3)$$

Avec,  $r_i$ ,  $r_d$ ,  $r_m$  et  $r_a$  les résistances de film interne, de l'encrassement, du métal et de film extérieur respectivement.

Les résistances de film interne, de l'encrassement sont standardisées dans des tableaux selon la nature de fluide.

La résistance au transfert due au métal  $r_m$  est le plus souvent égale à  $0.00015 \text{ h.m}^2.\text{°C/kcal}$

Le coefficient de film extérieur (l'air) est aussi fonction de U. Un calcul par approximation est donc nécessaire pour l'avoir. Les bases de données donnent des valeurs estimatives pour le coefficient global.

**Tableau I.5:** Les résistances de film interne, et de l'encrassement [ $\text{h m}^2 \text{ }^\circ\text{C/Kcal}$ ] [24]

Condensation de :	Coefficient de film $r_i$	Coefficient d'encrassement $r_d$
<b>Vapeur</b>	0.0002	0.0001
<b>Ammoniac</b>	0.00028	0.0002
<b>GPL</b>	0.0006	0.0002
<b>Hydrocarbures légers</b>	0.0008	0.0003
<b>Naphta léger</b>	0.001	0.0004
<b>Naphta lourd</b>	0.0014	0.0004
<b>Essence</b>	0.0008	0.0002
<b>Gas oil</b>	0.0014	0.0004

**Tableau I.6:** Relation entre la vitesse faciale, le coefficient de film extérieur et le nombre de rangées. [24]

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

**b. Détermination de la quantité de chaleur totale à évacuer :**

$$Q = M_1 x_1 (H_1 - H_2) \quad (\text{I.4})$$

**c. Détermination de la masse volumique de l'air dans les conditions de site :**

$$\rho_{air} = 1.201 * \left[ \frac{273.15+20}{273.15+t_1} \right] (1 - 2.256 * 10^{-5} Z)^{5.256} \quad (\text{I.5})$$

**d. Détermination de la température de sortie de l'air :**

La quantité de chaleur échangée par cellule est :

$$q = m_2 C_2 (t_2 - t_1) \quad (\text{I.6})$$

$$q = V_2 \rho_{air}(\text{à } t_1 \text{ et } z) C_2 (t_2 - t_1) \quad (\text{I.7})$$

Et d'autre part :

$$q = UAF DTLM \quad (\text{I.8})$$

$$q = UAF \left[ \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left( \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \right)} \right] \quad (\text{I.9})$$

Ce qui donne :

$$UAF \left[ \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \left( \frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1} \right)} \right] = V_2 \rho_{air}(\text{à } t_1 \text{ et } z) C_2 (t_2 - t_1) \quad (\text{I.10})$$

Une solution de l'équation permet d'avoir la température de sortie.

**e. Détermination de la quantité de chaleur échangée par cellule :**

$$q = m_2 C_2 (t_2 - t_1) \quad (\text{I.11})$$

**f. Détermination du nombre de cellules requises pour le service :**

$$N_c = Q/q \quad (\text{I.12})$$

**g. Détermination de la surface nécessaire par cellule:**

De l'équation,

$$q = UAF LMTD \quad (\text{I.13})$$

On détermine :

$$A = q/UF LMTD \quad (\text{I.14})$$

**h. Dimensionnement des ventilateurs :**

La surface totale des ventilateurs installée sur une baie doit être supérieure ou égale à 40% de sa surface faciale [17 ; 21]. Sur cette base le diamètre de ventilateur doit être choisi.

$$N\pi D^2/4 \geq A$$

Le débit volumique de l'air par ventilateur est donné par :

$$v_f \pi D^2/4 = V_2 \quad (\text{I.15})$$

## ***PARTIE B : LES HUILLES ESSENTIELLE***

---

### **I. HISTORIQUE :**

Depuis l'antiquité, l'homme a utilisé les plantes pour se soigner, et la phytothérapie est aussi vieille que la maladie. Chaque civilisation a développé sa propre science phytothérapeutique. Les Grecs, les Chinois, les Romains, les Hindous et les civilisations précolombiennes ont tous développé leurs propres remèdes à base de plantes. Mais qu'en est-il de l'aromathérapie ?

Bien que l'historique de la distillation et son utilisation dans la fabrication des huiles essentielles fut l'objet de beaucoup d'études, [27] il est difficile de fixer la date de la première extraction de ce que nous appelons aujourd'hui HE. L'art de distillation fut connu depuis l'antiquité par beaucoup de civilisations. Certains l'attribuent aux Perses lors de l'élaboration de l'eau de rose. Les Papyrus Ebers trouvés datant de 1500 a.v J.C laissent penser qu'il a été connu avec la carbonisation du bois. Les Egyptiens le pratiquaient comme art secret dans les temples [27]. Aristote décrivait la méthode d'obtention de l'eau distillée à partir de l'eau de mer par les marins. A cet époque le mot distillation désignait toutes les techniques de séparation, il pouvait être défini « Séparation goutte à goutte ».

Depuis des millénaires ; les aromates, les baumes et les résines furent utilisés pour l'embaumement, les cérémonies religieuses ou les sacrifices, mais nul document ne permet de conclure à la préparation d'HE [28]. Les Sumériens (en Mésopotamie I<sup>er</sup> millénaire av. J.-C) connaissaient déjà l'intérêt des arômes pour lutter contre certaines maladies [28].

Les appareils de distillation rudimentaires furent connus par les Hindous, les Perses et les Egyptiens ; mais ils étaient utilisés principalement pour les composés de mercure, de soufre et d'arsenic et non pas pour la distillation des essences [29]. Les arabes ; notamment Jabir Ibn Hayan « le père de la chimie » ; contribuent de façon considérable à l'étude des HE, leurs techniques d'obtention, de séparation et leur usage médical. Certains considèrent que la première HE comme définie actuellement fut produite par Ibn Sina (ou Avicenne). Ils avaient inventé aussi le serpentín pour perfectionner la réfrigération.

La description des HE a commencé par les européens, mais les distillats étaient fortement alcoolisés. Il fallait attendre l'invention du florentin par Jean Battista Della Porta (1537-1615) pour passer de l'eau distillée aromatique à l'HE. Ce savant italien a écrit aussi le "Liber de distillatione" en 1563 pour spécifier clairement les huiles grasses, les HE et la manière de séparer les essences des eaux distillées aromatiques. Ce n'est qu'au cours des XVI<sup>e</sup> et XVII<sup>e</sup> siècles que les HE ont reçu leurs premières applications en tant que telles et leur introduction dans le commerce [30].

Il sera nécessaire d'attendre la fin du XIX<sup>e</sup> siècle pour que soient précisées les vertus particulières des HE trop longtemps confondues avec celles des plantes dont elles sont extraites [28]. Les expériences se poursuivent pour découvrir leur pouvoir actif et leurs différentes applications. Le 20<sup>e</sup> siècle connaît un saut majeur dans l'industrie de distillation et d'extraction des HE.

## **II. DEFINITION :**

L'AFNOR définit les HE comme « des produits obtenus soit à partir des matières premières naturelles par distillation à l'eau ou à la vapeur d'eau, soit à partir des fruits de Citrus par des procédés mécaniques et qui sont séparés de la phase aqueuse par des procédés physiques » [30]. La pharmacopée européenne considère l'HE comme « Produit odorant, généralement de composition complexe, obtenu à partir d'une matière première végétale botaniquement définie, soit par entraînement à la vapeur d'eau, soit par distillation sèche, soit par un procédé mécanique approprié sans chauffage. L'HE est le plus souvent séparée de la phase aqueuse par un procédé physique n'entraînant pas de changement significatif de sa composition. » [31].

En effet, la plupart des végétaux renferment des HE, mais habituellement en quantité infime. Seules les plantes dites « aromatiques » en produisent en quantité suffisantes. Lorsque nous humons une rose, que nous épluchons une orange ou que nous fripons une feuille de menthe ou de romarin entre les doigts, c'est l'HE en train de se volatiliser car elle peut être contenue dans différentes parties de la plante [28 ; 32-33].

## **III. COMPOSITION CHIMIQUE :**

Les HE sont des composés chimiques très complexes, contenant une variété de constituants. Les principales familles des produits naturels qui se retrouvent comme constituant chimique des HE sont les terpènes et les phénylpropanes (composés aromatiques) [30 ; 32-33].

La composition chimique de l'HE de certaines plantes peut varier à l'intérieur d'une même espèce; on parle alors de chémotypes. Des facteurs exogènes (le climat, le sol, la région de culture, ...) et endogènes (partie de la plante) sont des paramètres qui influencent la composition de l'HE. De ce fait, on peut affirmer sans risque de se tromper que chaque plante constitue un cas particulier qu'il faut regarder, analyser avec circonspection. C'est pourquoi, la variation de la composition chimique en fonction de ces différents paramètres fait l'objet de beaucoup d'étude [33-35].

## **IV. LES TECHNIQUES D'OBTENTION DES HUILES ESSENTIELLES :**

La méthode d'obtention des HE intervient de façon déterminante dans le rendement et dans la composition de cette dernière. De plus, la distillation par exemple des petites charges au laboratoire ou dans des installations pilotes donne un produit pouvant être sensiblement différent de celui que l'on obtient à l'échelle industrielle [32 ; 34 ; 36-38].

Malgré les nouvelles méthodes de fabrication des HE mis en marche, la distillation à la vapeur reste la méthode la plus répandue ; 93 % des HE sont fabriquées grâce à cette méthode [26]. Car elle produit des substances volatiles facilement analysables par chromatographie en phase gazeuse (C.P.G.) et exige une technologie relativement simple. De plus, la séparation de l'HE suite à ce procédé est facile, ce qui permet de l'utiliser en médecine.

La distillation couvre trois modes reposant sur le même principe : entraînement des constituants volatils du matériel végétal par la vapeur d'eau. La différence entre eux réside dans le degré de contact entre l'eau liquide et le matériel végétal.

#### **IV.1 L'hydro distillation :**

Il s'agit de mettre le matériel végétal en contact direct avec l'eau bouillante dans un alambic. Les vapeurs sont ensuite condensées et l'arôme récupéré par une séparation des deux phases liquides immiscibles. Cette méthode est simple et peu coûteuse, cependant ; il faut veiller à réduire la durée de distillation pour diminuer les phénomènes de réaction avec l'eau car certains composés des HE sont facilement hydrolysables dans l'eau [32 ; 34 ; 36].

#### **IV.2 La vapo-hydro distillation :**

Le matériel végétal, dans ce cas, se trouve supporté par une grille ou une plaque perforée placée à une distance adéquate du fond de l'alambic. La partie inférieure de celui-ci est remplie d'eau. Le matériel végétal à distiller est en contact avec la vapeur seulement, ce qui réduit le phénomène d'hydrolyse. Cependant, il faut bien uniformiser la charge pour éviter les chemins préférentiels. Cette méthode est grande consommatrice de temps et d'énergie, lors du refroidissement de l'eau avant chaque décharge et son réchauffage après chaque chargement [32 ; 36].

#### **IV.3 La vapo distillation ; distillation par entraînement à la vapeur :**

Les plantes sont traversées par de la vapeur d'eau. A la sortie du récipient, cette vapeur qui s'est chargée d'HE, est condensée dans un serpentin refroidi par un courant froid. Un séparateur ou essencier recueille eau et huile et permet de retirer cette dernière par différence de densité. L'alimentation de l'alambic avec de la vapeur surchauffée permet une consommation plus faible d'énergie, et par conséquent, une réduction du coût de l'opération [32 ; 36].

#### **IV.4 L'hydro diffusion, la percolation :**

Elle convient parfaitement aux bois ou aux matériaux fibreux. Elle consiste à pulser de la vapeur d'eau à travers la masse végétale, du haut vers le bas. Ainsi le flux de vapeur traversant la biomasse végétale est descendant contrairement aux techniques classiques de distillation dont le flux de vapeur est ascendant [32 ; 37].

#### **IV.5 Distillation à haute pression et haute température :**

Ce mode utilisé industriellement pour la parfumerie permet une extraction plus complète des produits volatils en un temps plus court et avec moins de vapeur mais au détriment de la qualité. La haute température et la haute pression peuvent provoquer une décomposition de certains composés. En parfumerie d'autres purifications permettent d'en tirer des produits dont l'odeur est agréable, mais qui n'ont pas les propriétés souhaitées pour un usage médical [27].

#### **IV.6 Le cohobage ou la cohobation :**

Les eaux de distillation sortant du serpentin avec l'HE peuvent être réinjectées pour entraîner la matière végétale. Ce qui permet d'économiser l'eau et de récupérer les huiles en solution.

#### **IV.7 L'enfleurage ou extraction par la graisse froide :**

L'activité physiologique de certaines fleurs continue pendant 24H après leur cueillage. Une technique est réservée pour ce type de fleurs, c'est l'enfleurage par graisse froide. Elle consiste à faire absorber les HE par un corps gras, un lit de graisse, où on fait plusieurs passages de charge florale jusqu'à "saturation" en constituants volatils. On obtient ainsi une pommade que l'on doit traiter par l'alcool pour avoir un extrait d'enfleurage qui sera refroidi afin d'éliminer les traces de graisse. L'isolation des constituants volatils floraux du solvant se fait ensuite par concentration sous vide [32 ; 36-37].

#### **IV.8 La macération ou extraction par la graisse chaude :**

Pour les fleurs dont l'activité physiologique arrête après cueillage, la méthode de macération est utilisée. Le principe est le même que celui de l'enfleurage, cependant le résultat est obtenu plus rapidement [32 ; 36-37].

#### **IV.9 L'extraction par solvants**

Elle est utilisée pour les plantes fragiles qui sont plongées dans une préparation chimique provoquant la dissolution des substances aromatiques. Après séparation du solvant par distillation, on obtient un produit cireux qui doit être dissout avec de l'alcool. Ce dernier est ensuite éliminé par évaporation [37].

L'HE ainsi obtenue est dite «absolue». Ces HE contiennent toujours des p.p.m importantes des solvants organiques ; c'est pourquoi cette méthode est non utilisée si elles sont destinées à usage médical.

#### **IV.10 L'extraction par CO<sub>2</sub> supercritique :**

Les fluides supercritiques sont des solvants à géométrie variable ; c'est-à-dire qu'on peut par exemple mettre en œuvre facilement la variation de la solubilité à pression constante en fonction de la température. Le dioxyde de carbone qui devient supercritique à une température voisine de l'ambiante ( $T_c = 31^\circ\text{C}$ ) et à des pressions acceptables (de 8 à 20 MPa) est un parfait exemple. Bon marché, abondant, non toxique et non combustible [39].

Le principe consiste à amener le CO<sub>2</sub> à une pression et température choisies en fonction de l'oléorésine à extraire. Il traversera ensuite le matériel végétal où l'extrait sera dissout. Le CO<sub>2</sub> chargé de soluté subit ensuite une détente pour perdre ses propriétés de solvant. Au sein d'un séparateur, le CO<sub>2</sub> passe à l'état gazeux pour son recyclage, et l'oléorésine précipite pour sa récupération [39].

Malgré les avantages de cette méthode, notamment en termes de qualité de produit, son marché reste très limité du fait de son coût élevé.



#### **IV.11 Extraction par Micro-onde :**

L'extraction assistée par micro onde a élargit son domaine d'application ces dernières années. Dans le domaine des HE, le procédé utilisé est dit « VMHD » Vacuum Microwave Hydro Distillation breveté par Archimex. Les micro-ondes provoquent un éclatement des glandes à HE. Cette dernière, une fois libérée, peut être recueillie dans un solvant ou entraînée avec la vapeur d'eau contenue dans le végétal, vers un système de récupération fonctionnant sous vide [40].

Les procédés traditionnels d'extraction des HE présentent plusieurs inconvénients : énergivores, de longue durée, les résidus d'extraction gorgés d'eau et le risque des dégradations thermiques. Par contre, les HE extraites par le procédé VMHD présentent un profil très proche des essences contenues dans la matière première, en conservant la note « fraîche » du végétal d'origine. De plus, les procédés traditionnels ne sont pas polyvalents, l'hydro-distillation étant généralement réservée aux produits secs (graines, racines), la distillation à la vapeur aux produits frais (feuilles, sommités fleuries) [40].

#### **V. EQUIPEMENTS DE DISTILLATION D'UNE UNITE CLASSIQUE :**

Une unité classique comprend un alambic, un condenseur et un séparateur. Si le chauffage n'est pas fait à feu nu, un générateur de vapeur ou chaudière est aussi nécessaire.

##### **V.1 L'alambic :**

C'est le récipient dans lequel l'eau et/ou la vapeur sont mises en contact avec la plante. Le choix de la forme de l'alambic est gouverné d'une part par la facilité de chargement et de déchargement de la matière végétale et d'autre part, par le contrôle de la distribution uniforme de la vapeur.

Les premiers alambics étaient fabriqués en cuivre, actuellement remplacé par l'acier inoxydable. Pour les huiles à caractère acide, le fer galvanisé est recommandé.

Une bonne et complète isolation de l'alambic est recommandée pour éviter un excès d'énergie nécessaire et un prolongement de durée de distillation causés par la condensation de vapeur [32 ; 36].

##### **V.2 Le système réfrigérant ; le condenseur :**

Le système du réfrigérant a connu pas mal de stades de développement. Sa taille dépend de sa surface d'échange. Cette surface est fonction de la chaleur échangée, comme vu précédemment lors de l'étude de dimensionnement (équations I.8 et I.9)

Le fluide réfrigérant et la vapeur issue de l'alambic, circulent à contre courant. La température d'entrée du fluide réfrigérant, généralement l'eau, doit être aussi basse que possible ; mais ce n'est pas une règle générale. Car, à des températures basses, les constituants ayant une température de fusion élevée risquent de se solidifier [32 ; 36].

Le condenseur est fabriqué par l'étain ou l'acier inoxydable. Dans les unités traditionnelles, le fer galvanisé est encore utilisé.

### **V.3 Le décanteur ou le vase florentin :**

Cet élément de séparation appelé aussi essencier, sert à séparer l'HE de l'eau condensée par décantation ayant pour principe la différence de densité. Le tube de récupération de l'huile peut être positionné en haut, ou en bas du décanteur selon que l'HE est plus ou moins dense que l'eau. Ce qui donne deux types de décanteurs ; un troisième type existe lorsque l'HE présente deux fractions, une moins dense et une autre plus dense.

Comme le changement de température élargit l'écart des densités, il est conseillé de chauffer (ou refroidir) le mélange eau-HE lorsque les densités sont voisines.

Les décanteurs de petite taille sont fabriqués en verre, ceux de grande taille en acier inoxydable, en cuivre étamé, en fer galvanisé ou en aluminium [32 ; 36].

## **VI. LES PRINCIPALES APPLICATIONS DES HUILES ESSENTIELLES :**

Chaque HE est un mélange complexe de différents composés possédant différentes particularités et fonctions, cela peut expliquer la diversité de champs des applications des HE dans des domaines autres que celui de la médecine alternative. Il est vrai que ces produits sont particulièrement prisés comme thérapie alternative, notamment en homéopathie, massages, acupuncture et aromathérapie. Mais, la mise en lumière de plus en plus de d'autres particularités des HE par le progrès scientifique a dopé leur application dans le secteur des produits de beauté, des produits de nettoyages (détergents), de l'alimentation et de la parfumerie. Aujourd'hui, peu de gens réalisent combien de variétés des HE provenant des quatre coins de la planète, entrent dans les produits industriels que nous consommons chaque jour [30 ; 32 ; 35]. Le tableau I1.7 donne un petit aperçu sur les applications des huiles essentielles.

## **VII. LE MARCHE DES HUILES ESSENTIELLES :**

L'industrie des huiles essentielles, connue depuis l'antiquité, était centrée en Perse et dans le monde arabe (Syrie, Liban, Maroc, Egypte...) jusqu'au 17ème siècle. Elle s'est développée après en Turquie, dans les pays des Balkans et particulièrement en Bulgarie, aussi qu'en Europe. La production mondiale des huiles essentielles d'origine végétale est de l'ordre de 45.000 Tonnes dont 65% proviennent de l'extraction des parties d'arbres ou arbustes (cèdres, eucalyptus,...) [41].

Le marché mondial des HE connaît une compétitivité des produits provenant de pays en voie de développement où la production s'appuie sur une main d'œuvre rurale importante, et les pays industrialisés. Les principaux producteurs sont la Yougoslavie, l'Inde, l'Egypte, la Roumanie, l'Afrique du Sud, la France, l'Espagne, l'Italie, le Brésil, El Salvador, l'Iran, l'Emirates Arabes Unies.

**Tableau I.7 : Principales applications des huiles essentielles**

Secteur	Exemples
Pharmaceutique	Anti-inflammatoire
	Antispasmodique
	antalgique
	Anesthésique
	Saveur pour les sirops.
Alimentaire	Arome pour sauces, chewing gum, glaces, crèmes
	Boissons gazeuses / rafraichissantes/ alcooliques
	Conserves
Cosmétique	Parfum, déodorant, eau de Cologne.
	Soin corporel.
Parfumerie technique	Détergent
	Insecticides
	Désinfectant
Autres Industries	Peintures, Vinyl.
	Papiers
	Industrie textiles
	Tabac
Extraction/Isolement de quelques composés.	Linalol ; Menthol ;
Médecine alternative.	Aromathérapie.

L'Amérique du Nord (États-Unis, Canada, Mexique) constitue le marché le plus important au monde avec un volume de 4,4 milliards de dollars US en 2004, ce qui représente environ le tiers de la demande mondiale, suivi du marché européen et le Japon [42] [43].

A ce niveau, il est important de mentionner que cette production a une très haute valeur ajoutée et les prix d'un Kg d'huiles essentielles peuvent atteindre des niveaux très élevés [41]:

- L'huile essentielle de rose = 40.000 \$ / Kg
- L'huile essentielle de menthe poivrée = 96.000 \$ / Kg
- L'huile essentielle de menthe arvensis = 57.000 \$ / Kg

Suite à la forte demande sur les HE et leur coût élevé, certaines alternatives ont vu le jour. Dans les vingt dernières années, les HE synthétiques ont pris le monopole au détriment des HE naturelles, surtout dans le secteur de la parfumerie [41] [42] [44].

L'Algérie, malgré la diversité bioclimatique et le savoir faire ancestral (l'alambic était présent dans les maisons algériennes durant l'époque Ottomane) ne compte que quelques petites unités traditionnelles qui n'arrivent pas à satisfaire la demande croissante sur les HE des différentes espèces.

L'accès à l'information actualisée d'ordre économique dans ce domaine en Algérie est difficile ; les données disponibles datent de la fin du siècle dernier. Ce pendant elles peuvent fournir une idée globale sur l'état actuel de l'offre/ demande [44].

**Tableau I.8 : Evolution des importations des huiles essentielles en Algérie [44].**

Espèce	Les importations en termes de poids (Kg)				Le taux de croissance
	1996	1997	1998	1999	
HE de bergamote	5	-	5	26	420%
HE d'orange	55,23	30,15	107,83	150	97945%
HE de citron	3,56	7,06	27 828	6 243	175265%
HE de linette	140	3	-	-	-
HE d'agrumes	7,24	2,7	6269	223	141102%
HE de géranium	63	216	620	300	376%
HE de jasmin	136	50	941	697	413%
HE de lavande	240	62	286	-	-
HE de menthe poivrée	1,31	11,22	700	-	-
HE de menthe	36	104	277	80	122%
HE de verveine	6	-	-	-	-
Mélanges de substances	301,6	-	-	-	-
Résinoides	-	406	160	724	-
Solutions concentrées d'HE	48,43	39,39	5,68	-	-
Total des importations en poids (kg)	1 043,37	931,52	37 199,51	72 443,00	6843%

## ***PARTIE C : LE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE***

---

A l'aube de XXI siècle, l'autonomie énergétique est un des soucis majeurs des lors de la conception d'un appareil ou d'une installation. L'énergie solaire est une des meilleures alternatives à considérer. Malgré le coût élevé des installations photovoltaïques, leur application connaît un saut majeur ces dernières années, car elles permettent de produire l'électricité localement au fil du soleil, sans mouvement de pièces, sans pollution et sans bruit

### **I. HISTORIQUE :**

Un système photovoltaïque permet d'avoir de l'électricité à partir de l'énergie solaire. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur tel que le silicium (Si) qui génère alors une tension électrique [45]. Ce phénomène été découvert la première fois par le physicien français Becquerel en 1839, mais il fallait attendre 1954 pour que la première cellule en Silicon soit développée par laboratoire Bell. [46]

### **II. LE RAYONNEMENT ; DEFINITION DE L'IRRADIATION SOLAIRE :**

L'irradiation solaire en un lieu donné est l'énergie reçue pendant une journée par unité de surface (Wh/ m<sup>2</sup>. Jour) [47]. Généralement ; la valeur moyenne par mois ou par an est utilisée. Des bases de données regroupent les mesures effectuées au sol et les données satellitaires. Certaines bases sont propres aux entreprises (Tenesol), d'autres accessibles au public (PV-GIS) [47].

Ce rayonnement dépend des éléments suivants [46-47] :

- L'énergie envoyée par le soleil (qui change d'une saison à une autre par exemple)
- La position géographique des panneaux (latitude, attitude...Etc.)
- La hauteur du soleil (dépend de l'heure et la saison).

### **III. LES PANNEAUX SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES :**

Le terme de panneaux solaires est utilisé pour deux types d'usages différents, [48].

- Les panneaux solaires photovoltaïques ; faisant l'objet de notre étude.
- Les capteurs solaires thermiques, qui captent le rayonnement diffus pour chauffer de l'eau sanitaire ou des habitations.

#### **III.1 Définition :**

Comme vu précédemment, les panneaux photovoltaïques transforment la lumière du soleil en électricité. En effet les cellules photovoltaïques (des photopiles) sont assemblées en série dans un module, sous forme de surface vitrée, afin de produire une tension de 12, 24 ou 48 Volts en courant continu. Ces modules sont assemblés en "panneaux photovoltaïques" afin de fournir une puissance plus importante. Plusieurs panneaux sont regroupés sur des toits ou en façade pour former un "champs photovoltaïque" [49-51].

Un courant électrique continu est produit, sa tension dépend du nombre de cellules existantes et de leur performance. L'intensité du courant dépend de la surface totale des cellules, de leur performance, et aussi de l'irradiation solaire sur la région considérée. Ce courant est converti en courant alternatif par un onduleur solaire [49-51].

Il existe principalement deux grandes familles de panneaux solaires photovoltaïques [49] :

- Les panneaux cristallins ; pour les installations sans ombre. Ils peuvent être monocristallins ou polycristallins.
- Les panneaux amorphes ; pour les installations avec de l'ombre.

#### **IV. LES CARACTERISTIQUES D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE :**

- **La puissance crête :** c'est la valeur qui identifie un module. Elle est égale à la puissance maximale obtenue pour un éclairement de 1000 w/m<sup>2</sup>, une température de jonction avoisinant les 25 °C ; et un spectre solaire correspondant à un soleil sous AM1,5 [47 ; 49-50].
- **Dimensions :** un peu moins de 1 m<sup>2</sup> pour 100 W.
- **Tension nominale :** Tension de la batterie susceptible d'être associée au module (12 V, 24 V, 48V).
- **Durée de vie :** De l'ordre de 25 ans (10 ans en environnement maritime et tropical)

#### **V. LE KIT SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE :**

Un système solaire comporte principalement [47-51]:

- Modules photovoltaïques.
- Câbles électriques.
- Structures de montage : cadres des modules solaires.
- Boite de dérivation.
- Régulateur ; qui transmet le courant généré par les panneaux aux batteries.
- Batterie ; servant comme réservoir d'électricité.

#### **VI. LE STOCKAGE DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE ; CHOIX DE LA BATTERIE :**

Le photovoltaïque est une énergie intermittente, qui nécessite un système de stockage électrique permettant de restituer l'énergie à la demande.

Les générateurs photovoltaïques autonomes ont besoin d'un stockage électrique pour assurer une fourniture d'énergie quasi permanente quelles que soient les séquences d'ensoleillement. Suivant les applications, cette fourniture d'énergie sera assurée, par exemple, pendant deux à trois jours pour certains petits systèmes domestiques à une quinzaine de jours pour les applications professionnelles, comme les phares maritimes. Les différentes applications font appel à des batteries de technologie différente afin de garantir le service rendu. Les batteries

au plomb, en raison de leur faible coût et de leur simplicité de mise en œuvre, sont pour l'instant les plus utilisées [52].

En effet ; il existe des jours sans soleil, pendant lesquels la batterie devra compenser le déficit de production et alimenter l'utilisation. Cette situation doit pouvoir durer pendant le nombre de jours d'autonomie choisi, qui diffère d'une batterie à une autre.

Les taux de décharge quotidienne et profonde jouent sur la durée de vie de la batterie. La littérature propose taux de décharge profonde égal à 70% au plus, de décharge quotidienne égale à 20% au plus. Ce qui impliquera 3 jours d'autonomie au moins.

La batterie est le composant le plus dangereux, des précautions sont indispensables pour son installation [47] :

- Installation dans un coffre spécialement étudié pour installation à l'extérieur.
- Local sans autre affectation et accessible seulement au personnel habilité
- Local construit avec des matériaux non combustibles
- Sol imperméable et bac de rétention en cas de fuite d'électrolyte
- Ventilation naturelle haute et basse
- Batterie installée de façon à pouvoir vérifier aisément le niveau d'électrolyte
- Pas d'appareillage électrique non antidéflagrant
- Porte s'ouvrant vers l'extérieur

## **VII. ESTIMATION DES COÛTS :**

Le coût d'investissement d'un générateur photovoltaïque est sensiblement proportionnel à l'énergie journalière qu'il peut fournir. Les éléments les plus coûteux sont les panneaux solaires, la batterie et l'onduleur [47].

En 25 ans, le prix de revient du watt photovoltaïque a considérablement baissé : supérieur à 100 francs par watt en 1975, il est aujourd'hui tombé aux environs de 2 € par watt. Le prix de vente du module photovoltaïque est de 2,6 € par watt en 2005, est en baisse constante de 10 à 15 centimes d'euro par watt par an. Le coût d'un système installé de l'ordre de 3 kW connecté à un réseau est de 5 à 6 € par watt et de 8 à 10 € par watt pour un système en site isolé avec stockage par batteries [53].

## **VIII. LE POTENTIEL SOLAIRE ALGERIEN :**

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire 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 1m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kwh/m<sup>2</sup>/an au Sud du pays.

L'Atlas Algérien fournit des cartes solaires donnant l'irradiation mensuelle à inclinaison horizontale et normale.

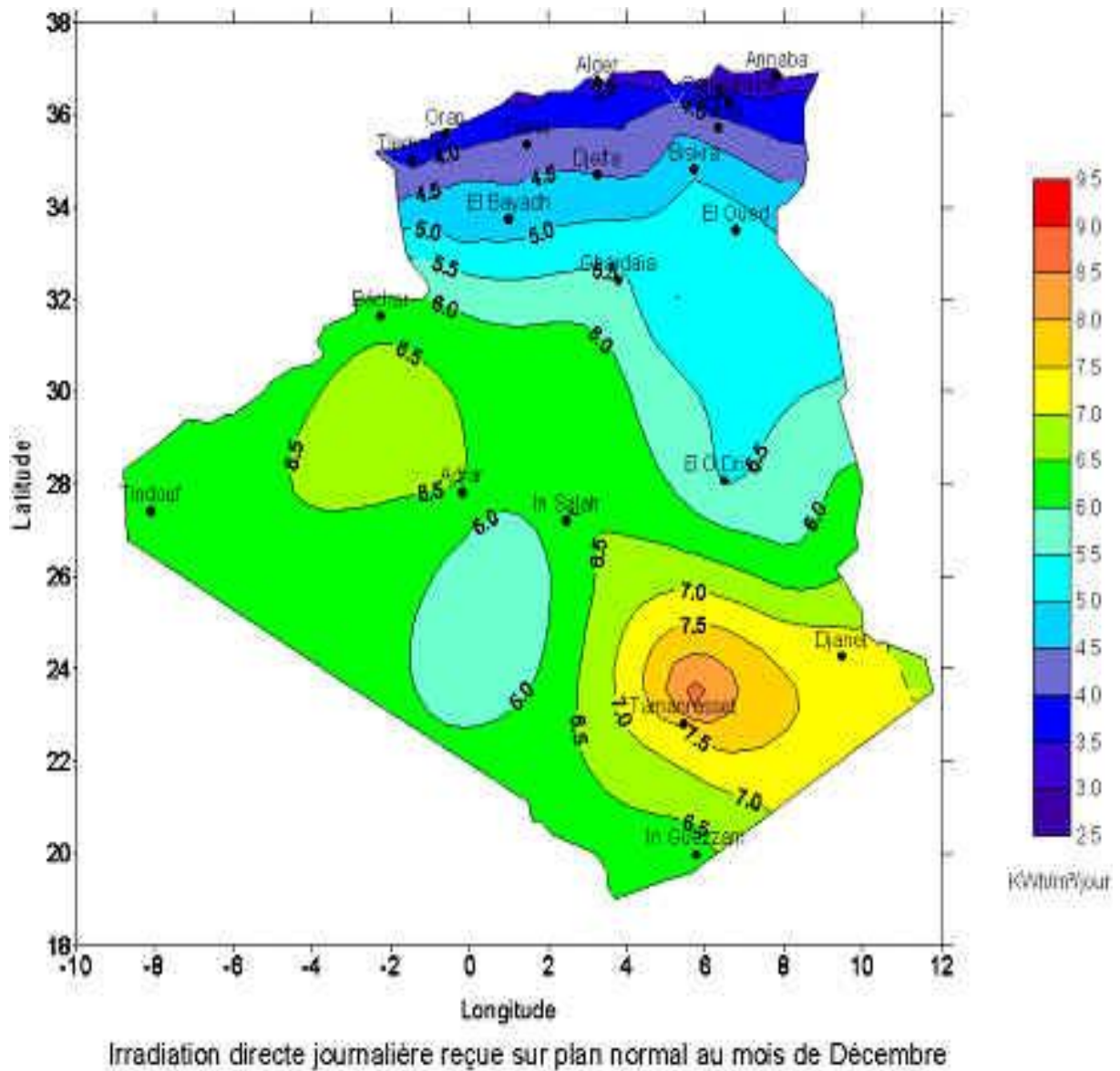


Figure I.2 : L'Irradiation directe journalière reçue sur plan normal au mois de Décembre [54]



## ***PARTIE D : ETUDE ECONOMIQUE***

---

### **I. INTRODUCTION :**

Lors de la mise en œuvre d'un projet, la préoccupation majeure reste la possibilité de son application à l'échelle industrielle et le degré de sa rentabilité dans ce cas là. Une étude technico-économique ou étude de faisabilité sera élaborée afin d'accepter ou de refuser la concrétisation d'un projet.

### **II. METHODES DE CALCUL D'INVESTISSEMENTS :**

Il existe de nombreuses méthodes d'estimation et d'évaluation. Ces méthodes sont variables et différent principalement dans la rapidité et la précision. C'est pourquoi, le choix est vraiment difficile. Les ouvrages spécialisés donnent des méthodes à appliquer pour des appareils définis; ce qui peut aider le chercheur à trouver et appliquer ce qui colle avec son cas. Dans ce qui suit, nous citons les grandes catégories de ces méthodes [14 ; 24 ; 56-58].

#### **II. 1 Les méthodes exponentielles à facteur d'extrapolation :**

Le coût d'une nouvelle installation peut être estimé rapidement à partir des données historiques d'installations semblables. Il s'agit d'une extrapolation des investissements connus [14 ; 56-58].

La première corrélation est basée sur le rapport des capacités :

$$C_2/C_1 = (S_2/S_1)^n \quad (I.16)$$

Avec :  $C_2$  ;  $C_1$  : coût des installations de capacités  $S_2$ ,  $S_1$  respectivement. Et l'indice  $n$ , est généralement pris égal à 0.6.

D'autres corrélations prennent en compte d'autres facteurs :

- L'évolution au cours du temps des prix ; il s'agit d'une actualisation des coûts. Les plus connues sont : l'indice CE et M&S dans le secteur de la chimie et Nelson dans le secteur pétrolier.
- La localisation en comparant les coûts d'installations construites dans divers pays ou sur différents sites.
- La parité monétaire ou le taux de change en passant d'un pays à un autre.

Deux ou plusieurs facteurs peuvent être combinés en une seule corrélation, par exemple pour estimer le coût d'une installation de capacité 20000 ton/ an en Algérie en l'an 2012 basant sur des données historiques d'une installation pareille de capacité 5000 ton/an aux Etats Unies crée en 1980.

Pour la mêmes raisons géographiques ; certaines corrélations est tables d'indices sont présentés dans les ouvrages, notamment les études de CRAN et Guthrie [56-57].

## **II. 2 Les méthodes factorielles avec facteurs multiplicatifs constants ou variables :**

### **a. Facteur de Lang :**

Les méthodes factorielles, attribuées à Lang (1948) ; sont basées sur le principe que le coût du matériel principal est une caractéristique de chaque appareil et que le coût du capital peut être tiré en connaissant le coût d'achat de ce matériel par une corrélation [14 ; 56-57].

$$C_f = F_L * C_m \quad (I.17)$$

Le coût du capital fixe est le produit de facteur de Lang par le coût des équipements majeurs (échangeurs de chaleur, réacteurs, colonnes...etc.)

Le facteur de Lang est égal à : 3.1 si la phase dominante est solide ; 4.7 si elle est fluide et à 3.6 si c'est fluide-solide.

### **b. Méthode factorielle détaillée :**

Pour plus de précision, d'autres coûts (autres que le coût des équipements) sont considérées.

- Le coût du terrain, de son terrassement, les travaux de Génie Civil et des bâtiments auxiliaires.
- Tuyauterie, peinture et isolation.
- Control et instrumentation.
- Electricité, éclairage, eau, énergie.
- Montage des équipements

Cette méthode fait attribuer à chaque item un facteur qui sera multiplié par le coût du matériel principal, le coût total sera la somme [14 ; 56-57].

Notons toutefois qu'il faut faire attention lors du choix des facteurs liés aux prix des équipements. On peut considérer les prix FOB, les prix à la sortie d'usine EXW ou les prix des équipements installés [56].

Les facteurs et les indices de ces méthodes sont actualisés périodiquement par les spécialistes. Aux états unis, par exemple ; les indices de Nelson-Farrar sont donnés trimestriellement par le « Oil and Gas Journal » [56]. En France, d'autres indices de coûts sont appliqués, notamment l'indice de R.Boulitrop (Technique de l'ingénieur) [57].

### **c. Autres méthodes :**

Des méthodes utilisant des analyses plus affines sont développées par des instituts. Des logiciels sont aussi mis en marche [14 ; 24 ; 57].

- Méthode PRESTIME de l'IFP
- Méthode du SRI (Stanford Research Institute)

- Le logiciel: PDQS Price and Delivery Quoting Service
- Le logiciel: ICARUS (Investigating Costs and Reliability in Utility Systems)

### III. LES CHARGES D'INVESTISSEMENT, LE DECOUPAGE TYPE DU COUT OPERATOIRE:

#### III.1 Les charges fixes:

C'est le coût total de l'installation prête au démarrage, ce qui inclut [14 ; 56-58]:

- Les frais d'études et d'Engineering.
- Le coût de matériel et de son installation.
- Le coût de tuyauterie, d'instrumentation et de control.
- Prix de terrain, de bâtiments auxiliaires et de travaux de génie civil.

#### III.2 Les charges amortissables [56-58] :

- Les charges initiales : le coût de certains matériaux qui doivent être ajoutés aux équipements pour que ces derniers se mettent en marche ; par exemple les catalyseurs, les absorbants, les tamis moléculaires...etc.
- Les frais de démarrage
- Les besoins énergétiques (électricité, combustibles, vapeur, frigories) ; annexes (eaux refroidissement, procédé, chaudière, gaz d'inertage ...) et production (vapeur, gaz combustibles).

#### III.3 Le fonds de roulement :

C'est le coût supplémentaire ajouté au capital fixe pour l'opération avant de commencer à avoir des revenus.

La figure suivante donne un découpage type du coût opératoire :

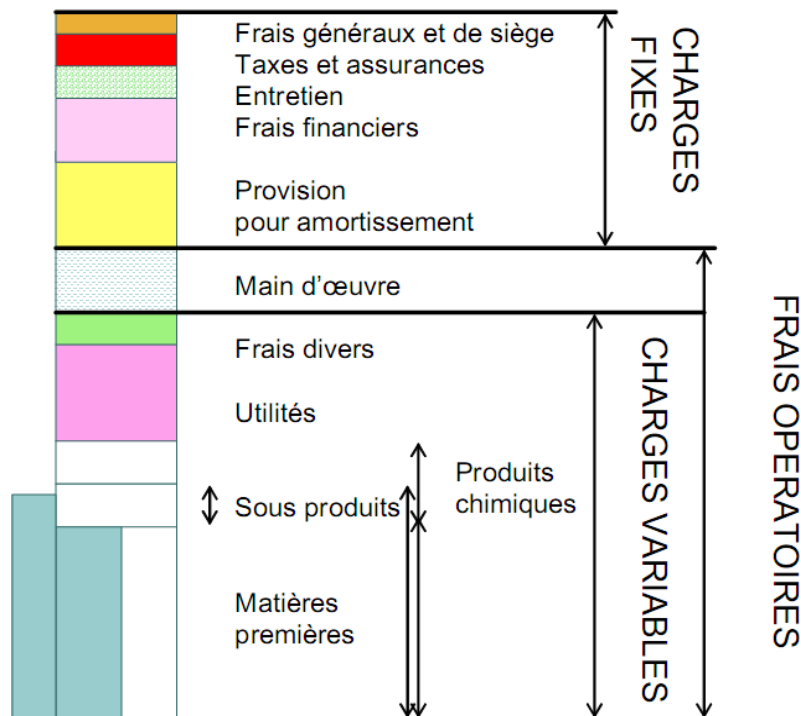


Figure I.3 : Découpage typique des frais opératoires [57]

# PARTIE PRATIQUE

## ABREVIATIONS

### Partie A:

<b>A</b>	Surface d'échange globale.	[m <sup>2</sup> ]
<b>C<sub>2</sub></b>	Capacité thermique massique de l'air	[J/Kg.K]
<b>D</b>	Diamètre de ventilateur	[m]
<b>D<sub>1</sub></b>	Débit massique de la vapeur d'eau	[Kg/h]
<b>D<sub>2</sub></b>	Débit volumique de l'air	[M <sup>3</sup> /h]
<b>DTLM</b>	différence Logarithmique moyenne des températures (en contre-courant)	
<b>D<sub>Tuyau</sub></b>	Diamètre du tube de serpentin	[m]
<b>F</b>	Facteur correctif de DTLM.	
<b>G</b>	Le pourcentage de puissance gagnée en passant de température de sortie t <sub>2</sub> = 30°C à la température considérée.	
<b>L</b>	Longueur totale du tube serpentin	[m]
<b>l</b>	Longueur du tube serpentin, figure (II.8)	[m]
<b>N</b>	Nombre de ventilateurs	
<b>N'</b>	Nombre de ventilateurs sur une rangée ( Figure II.9 & II.10)	
<b>P</b>	Puissance de ventilateur	[CV] ou [W]
<b>P<sub>entrée</sub></b>	Pression d'entrée	Kpa
<b>P<sub>sortie</sub></b>	Pression de sortie	Kpa
<b>Q</b>	Le flux de chaleur	[Kcal/h]
<b>T<sub>1</sub></b>	Température d'entrée de fluide à condenser (vapeur d'eau)	[°C].
<b>T<sub>2</sub></b>	Température de sortie de condensat (Eau liquide);	[°C].
<b>U</b>	Coefficient de transmission thermique global	[Kcal/h. m <sup>2</sup> .°C] ou [W/m <sup>2</sup> K].
<b>UA</b>	Produit de coefficient de transmission par la surface d'échange	
<b>Z<sub>1</sub></b>	Largeur du rectangle sur lequel est disposé le serpentin, figure (II.8)	[m]
<b>Z<sub>2</sub></b>	Longueur du rectangle sur lequel est disposé le serpentin, figure (II.8)	[m]
<b>R</b>	Pourcentage d'erreur	
<b>R<sup>2</sup></b>	Coefficient de détermination	
<b>d</b>	Diamètre interne de courbure du tube serpentin (figure II.8)	
<b>n</b>	Le nombre de courbures du tube serpentin (figure II.8)	
<b>r<sub>a</sub></b>	la résistance de film extérieur	[h.m <sup>2</sup> . °C/ Kcal].
<b>r<sub>d</sub></b>	la résistance de l'encrassement	[h.m <sup>2</sup> . °C/ Kcal].
<b>r<sub>i</sub></b>	la résistance de film interne	[h.m <sup>2</sup> . °C/ Kcal].
<b>r<sub>m</sub></b>	la résistance du métal	[h.m <sup>2</sup> . °C/ Kcal].
<b>t<sub>1</sub></b>	Température d'entrée de l'air	[°C].
<b>t<sub>2</sub></b>	Température de sortie de l'air	[°C].
<b>v<sub>f</sub></b>	vitesse faciale de l'air	[m/s].
<b>x<sub>1</sub></b>	Titre massique en vapeur d'eau	
<b>α</b>	Solution mathématique de l'équation (II.6)	

## Partie B:

<b>E<sub>d</sub></b>	Production journalière moyenne d'électricité	[kWh]
<b>E<sub>m</sub></b>	Production mensuelle moyenne d'électricité	[kWh]
<b>H<sub>d</sub></b>	l'irradiation journalière globale par mètre carré du système considéré	[kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>H<sub>m</sub></b>	l'irradiation mensuelle globale par mètre carré du système considéré	[kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>H<sub>hor</sub></b>	L'irradiation solaire à inclinaison horizontale	[Wh/m <sup>2</sup> .Jour]
<b>H<sub>(90)</sub></b>	L'irradiation solaire à 90°	[Wh/m <sup>2</sup> .Jour]
<b>H<sub>Opt</sub></b>	L'irradiation solaire à l'angle d'inclinaison optimale	[Wh/m <sup>2</sup> .Jour]
<b>I<sub>opt</sub></b>	L'angle d'inclinaison optimal pour chaque mois	[°C]
<b>S<sub>p</sub></b>	Surface du panneau photovoltaïque nécessaire	[m].
<b>PV-GIS</b>	Photovoltaic Geographical Information System	

## Partie C:

<b>P<sub>b</sub></b>	Prix de base
<b>P<sub>r</sub></b>	Prix réel
<b>C</b>	Coefficient de coût.
<b>DRI</b>	Délai de retour sur investissement
<b>f<sub>e</sub></b>	facteur de correction d'épaisseur pour le prix des aérorefrigérants.
<b>f<sub>p</sub></b>	facteur de correction de pression pour le prix des aérorefrigérants.
<b>f<sub>l</sub></b>	facteur de correction de longueur de tube pour le prix des aérorefrigérants.
<b>f<sub>N</sub></b>	facteur de correction de nombre de rangées pour le prix des aérorefrigérants
<b>f<sub>m</sub></b>	facteur de correction de matériau pour le prix des aérorefrigérants.

## ***PRESENTATION DE NOTRE ETUDE :***

---

Au laboratoire de valorisation des énergies fossiles de l'Ecole Nationale Polytechnique, et dans le cadre des travaux de recherche de l'équipe de valorisation des espèces végétales ; plusieurs études d'extraction des HE ont été menées [34 ; 44]. Le travail suivant est une contribution à l'étude d'un aérocondenseur faisant partie d'une unité d'extraction mobile, baptisée Mobilab [19-20] et qui se veut autonome en eau et en énergie. Les unités classiques sont généralement dotées d'un condenseur à eau, nous étudions la possibilité de son remplacement par un aérocondenseur alimenté par de l'énergie solaire photovoltaïque.

L'unité d'extraction mobile « Mobilab » est composée des éléments principaux suivants.

- Une chaudière : cheminée en brique réfractaires pour la production de vapeur utilisant l'énergie de combustion de la biomasse.
- Un extracteur : la technologie des caissons mobiles est adoptée.
- Un condenseur ;
- Un décanteur : séparateur de l'HE et l'hydrolat
- Un système de cohobage : permettant de réinjecter l'hydrolat dans le ballon de la cheminée.

Trois Mobilab de différentes capacités font l'objet de notre étude. Les caractéristiques de chaque Mobilab sont données en annexe 01.

Dans une première étape, le dimensionnement de l'aérocondenseur, a été effectué moyennant le logiciel Hysys, et un programme de calcul sur Excel a été élaboré afin de pouvoir choisir l'aérocondenseur adéquat pour chaque Mobilab.

Une fois les caractéristiques et les conditions de fonctionnement de chaque aérocondenseur sont déterminées, nous nous sommes intéressés au dimensionnement du système photovoltaïque au moyen du logiciel PV-GIS.

Enfin, une étude économique a été menée dans le but de constituer un outil d'aide à la décision d'un investissement dans ce sens.

## PARTIE A : DIMENSIONNEMENT DE L'AEROCONDENSEUR :

---

Cette étude passe principalement par 5 étapes:

- **1ère étape :** la recherche exploratoire
- **2ème étape :** utilisation de Hysys pour l'étude des variations de débit de l'air et de « UA » (réponses) en fonction de différents variables (facteurs).
- **3ème étape :** Programme de calcul Excel ; construction d'une base des données.
- **4ème étape :** Le choix de ventilateur et calcul de puissance.
- **5ème étape :** Modélisation mathématique.

Ces étapes ; bien qu'elles sont énumérées et classées ainsi, ne sont pas tout à fait séparées : en effet ; un calcul est effectué de manière itérative par approximation successive.

Notons toutefois que la méthode de Pré-estime [24] sera appliquée pour l'étude économique détaillée plus tard. C'est pourquoi nous faisons recours aux données existantes sur cet ouvrage pour le calcul du coefficient de transfert thermique global et de puissance consommée.

### I. LA RECHERCHE EXPLORATOIRE :

Au début de notre étude, et comme beaucoup de choses sont ignorées sur ce qu'on va étudier, on est amenés à faire des expériences préliminaires ayant pour but :

- D'une part de fixer les caractéristiques techniques (diamètre et débit) du ventilateur que nous allons utiliser
- D'autre part de choisir les facteurs et le domaine de leurs variations (domaine expérimental) qui sera exploré plus finement afin d'écrire :
  - La puissance totale de système de ventilation ; et
  - La surface d'échange nécessaire

En fonction des facteurs choisis, dans un domaine déterminé.

Les caractéristiques techniques des ventilateurs sont choisies selon un double critère à savoir : un coût réduit et un large domaine d'utilisation.

### II. ETUDE DE VARIATION DE DEBIT DE L'AIR ET DE « UA » EN FONCTION DE DIFFERENTS VARIABLES :

Cette étape est scindée en deux parties. La première consiste à utiliser le logiciel HYSYS pour la collection des données, la deuxième à représenter ces résultats mathématiquement (cette partie sera traitée à part).

Le but est d'étudier les variations de quelques paramètres appelés réponses, en fonction d'autres appelées facteurs (variables d'entrées).



Les intervalles de ces facteurs sont choisis aléatoirement au début de notre étude. Le domaine expérimental sera défini plus tard comme expliqué précédemment

**Tableau II.1 :** Variables d'entrée et de sortie pour HYSYS.

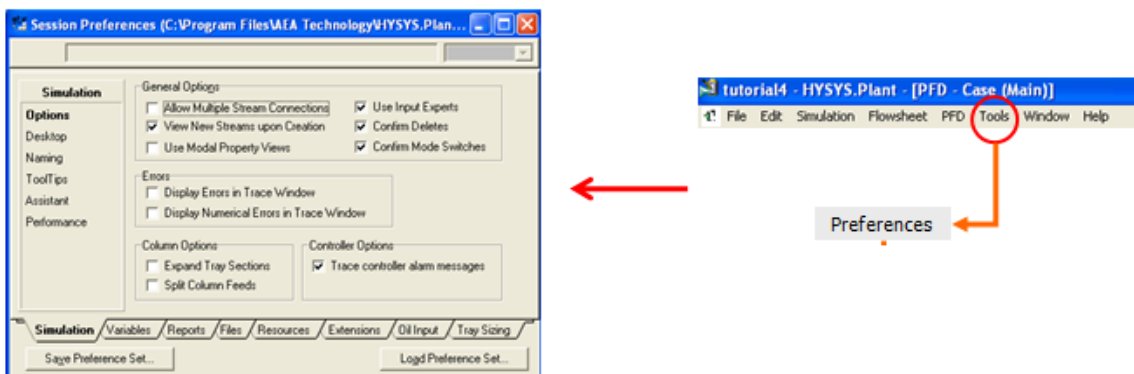
Paramètres fixes d'entrées	Variables d'entrées Facteurs	Variables de sortie Réponses de Hysys.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• composition: eau pure 100 % vapeur à l'entrée</li> </ul>	Ville d'Alger : $20 < t_1 < 30^{\circ}\text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• UA.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• condensation totale : eau pure 100 % liquide à la sortie</li> </ul>	$30 < t_2 < 50^{\circ}\text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• D<sub>2</sub>.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• P entrée: 100 Kpa</li> </ul>	$30 < T_2 < 40^{\circ}\text{C}$	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• P sortie : 99 Kpa</li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• T<sub>1</sub>=105°C.</li> <li>• D<sub>1</sub>=50, 100, 200 Kg /hr selon le Mobilab.</li> </ul>		

## II. 1 Présentation du logiciel HYSYS :

HYSYS ; commercialisé par la société Hyprotech ; filiale d'AspenTech est un logiciel de simulation de procédés chimiques utilisé dans beaucoup d'industries de procédés qui permet de simuler le fonctionnement d'installations chimiques complexes en régime permanent et en régime dynamique. A partir de la donnée des corps impliqués dans la transformation chimique et les séparations, des modèles thermodynamiques permettant de décrire entre autres les équilibres liquide-vapeur sur lesquels reposent les séparations, des cinétiques des réactions chimiques et enfin, du schéma de procédé [60-61].

### a. Choix du système d'unité :

Après lancement de hysys, nous accédons à la session préférences.



**Figure II.1 :** Choix du système d'unités (a)

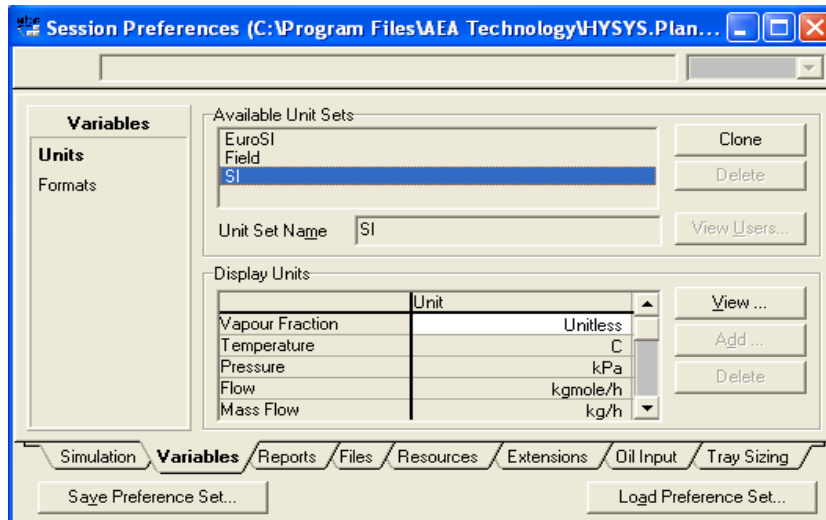


Figure II.1 : Choix du système d'unités (b)

### b. Création de « fluid package » :

Un nouveau fichier Hysys est crée pour la nouvelle simulation :

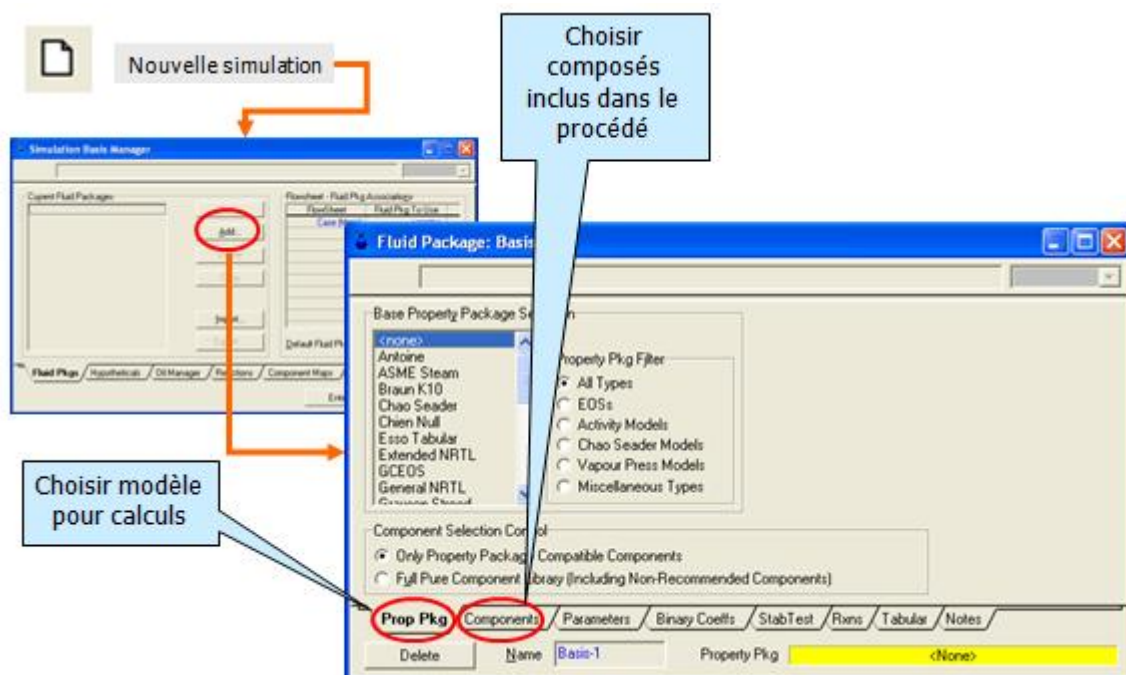


Figure II.2 : Création de « fluid package »

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

c. Choix des composés de procédés :

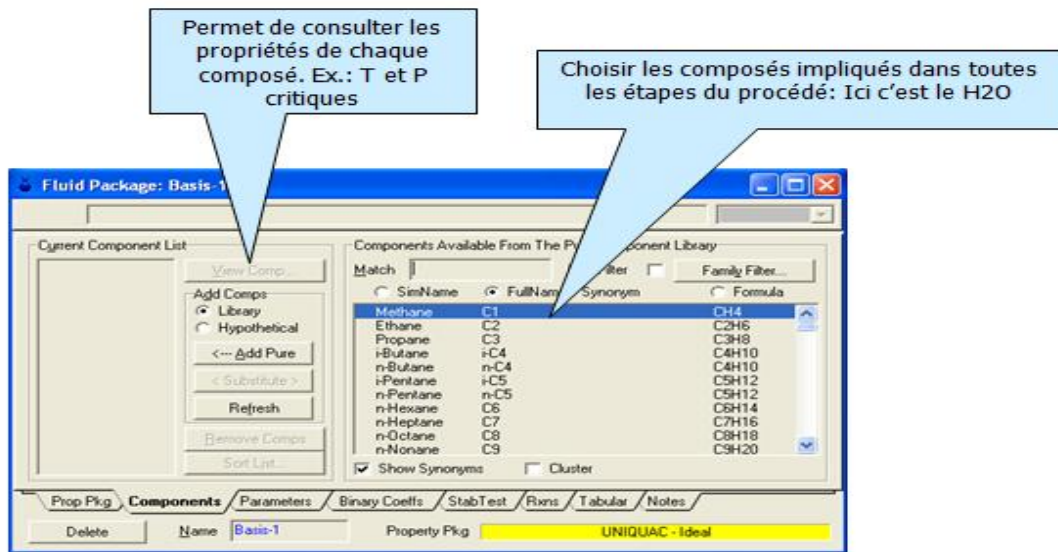


Figure II.3 : Choix des composés de procédés

d. Caractéristiques de courants d'entrée et de sortie :

Le système utilisé est un aérocondenseur « Air Cooler », le courant d'entrée est « Water Inlet », de sortie est « Water-Outlet ». Les caractéristiques sont données dans les tableaux suivants.

Worksheet	Stream Name	Water_Inlet	Vapour Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	1,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	105,0	105,0
Composition	Pressure [kPa]	100,0	100,0
K Value	Molar Flow [kgmole/h]	5,551e-002	5,551e-002
User Variables	Mass Flow [kg/h]	1,000	1,000
Notes	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	1,002e-003	1,002e-003
Cost Parameters	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2,384e+005	-2,384e+005
	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	133,1	133,1
	Heat Flow [kJ/h]	-1,323e+004	-1,323e+004
	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	1,001e-003	1,001e-003
	Fluid Package	Basis-1	

Figure II.4 : Caractéristiques du courant d'entrée

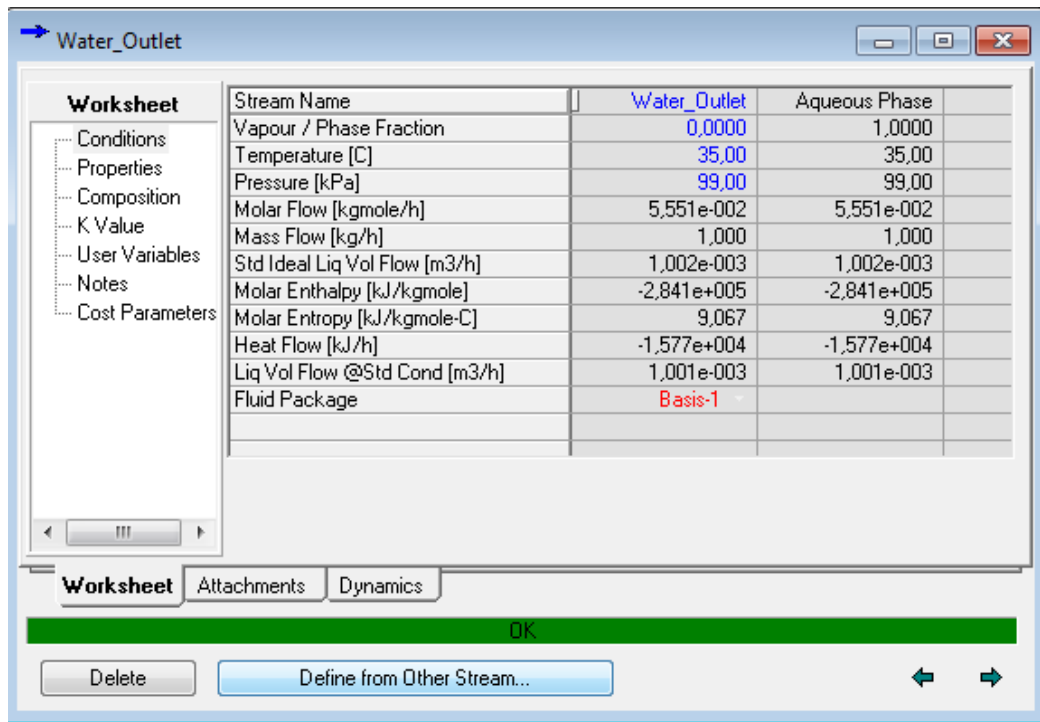


Figure II.5 : Caractéristiques du courant de sortie

e. La simulation de l'aérocondenseur :

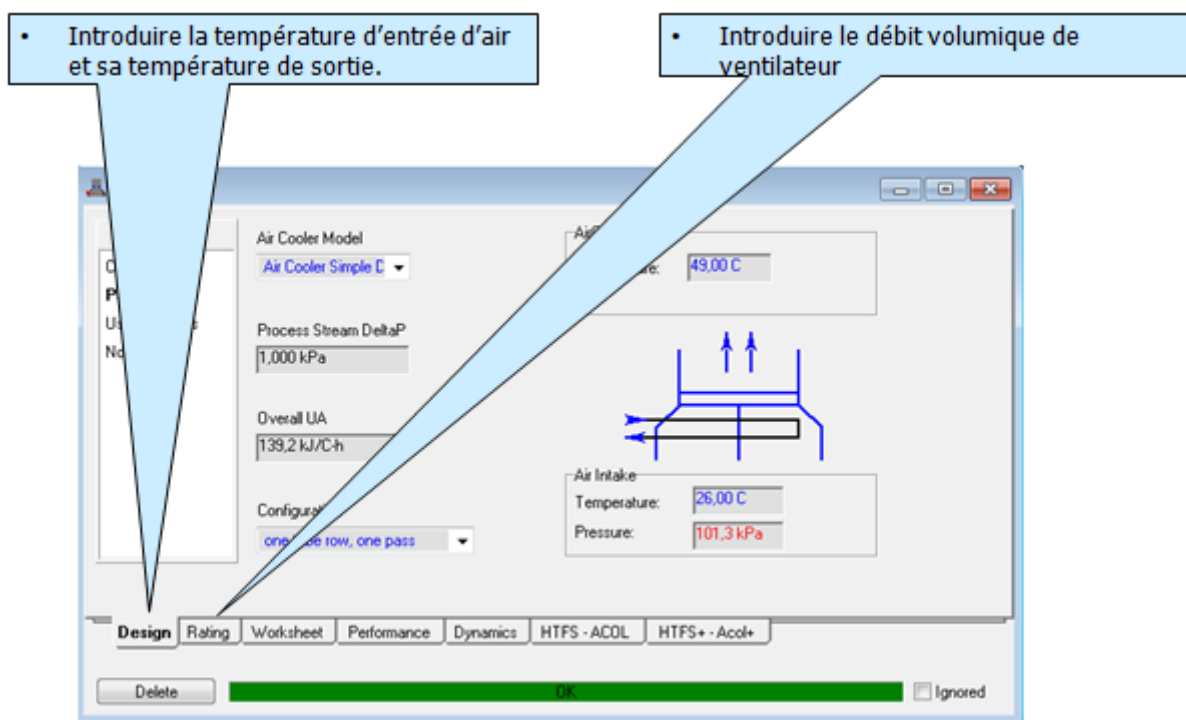


Figure II.6 : La simulation de l'aérocondenseur

## II. 2 Calcul de la surface d'échange :

A partir des variables de sortie UA et  $D_2$  données par Hysys, des études théoriques et des bases de données existantes, on peut avoir :

- La surface d'échange.
- Les caractéristiques du système de ventilation : (puissance, vitesse faciale, nombre de ventilateurs, section faciale).

### a. Le coefficient d'échange global U

Le coefficient d'échange global U de l'aérocondenseur était déterminé par l'équation (I.3).

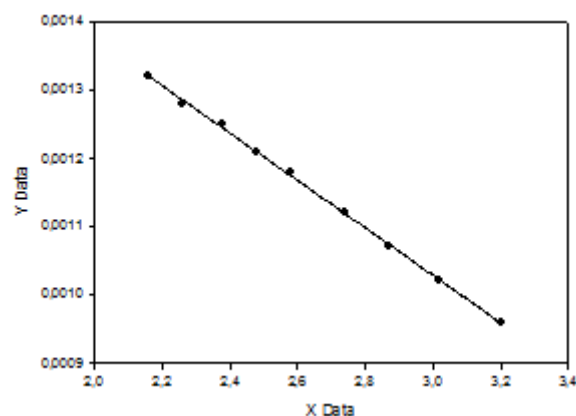
Dans le cas des aérocondenseurs, le coefficient du film est fonction de la vitesse faciale de l'air comme indiqué dans le tableau I.6.

La vitesse faciale de l'air est le rapport du débit volumique de l'air (donné par le Hysys) et la section faciale ( $\pi * D^2 / 4$ ) du ventilateur. Là on peut voir l'importance de choix de ventilateur (débit et diamètre) dans le calcul du coefficient d'échange thermique et de la surface d'échange globale.

### b. Coefficient de film extérieur et vitesse faciale :

Le tableau I.6 illustre le cas les aérocondenseurs à plusieurs rangés rencontrés en industrie, dans notre cas ; il s'agit d'un serpentin comme détaillé précédemment on choisira donc une vitesse légèrement supérieure à 3.2 m/s. on vérifie après les calculs que la condition  $((T_1 - t_1)/U) < 0.13$  est toujours vérifiée.

A l'aide du tableau ; on établie un modèle mathématique illustrant la variation de  $r_a$  en fonction de la vitesse faciale :



**Figure II.7 :** la variation de la résistance du film extérieur en fonction de la vitesse faciale

$$Y = 2,0725e-3 - 3,4793e-4 * X \quad (II.1)$$

Avec  $y = r_a$  ; et  $x = V_f$

Le choix d'un ventilateur consiste à choisir la vitesse de rotation et le diamètre de ce dernier (et par conséquent la vitesse faciale et le débit volumique).

### c. Le choix du couple (débit volumique, diamètre) :

Si on augmente le débit volumique, le nombre de ventilateurs nécessaires diminue, ou on diminue le diamètre de ventilateur ; la vitesse faciale augmente, la résistance du film d'air diminue et  $U$  augmente, par conséquent la surface  $A$  diminue. On cherche à optimiser notre choix.

Il s'agit alors de choisir différents couples (débit volumique, diamètre de ventilateurs) et calculer le nombre de ventilateurs nécessaire et la surface d'échange à chaque fois.

- ✓ Choix de différents diamètres
- ✓ Calcul de la vitesse faciale pour les débits volumiques choisis ;
- ✓ Vérifier que la vitesse faciale est supérieure légèrement à 3.2 m/s et que
- ✓ La condition de  $((T_1-t_1)/U) < 0.13$  est vérifiée.

Là, un autre problème apparaît et on se pose d'autres questions : la disposition de notre système de ventilation va-t-elle réduire encore le domaine d'utilisation du ventilateur ?

### II.3 La disposition du système de ventilation et du serpentin.

Pour ne pas s'éloigner du secteur industriel toujours, la surface des ventilateurs minimale requise doit représenter 40 % de la baie réfrigérante. La baie réfrigérante est un rectangle de dimension  $Z_1, Z_2$ . Comme le serpentin est fixé contre le mur de Mobilab, les dimensions de la baie réfrigérante vont dépendre de celles des containers. Notons que nous avons trois Mobilab de différentes tailles (**Annexe 01**)

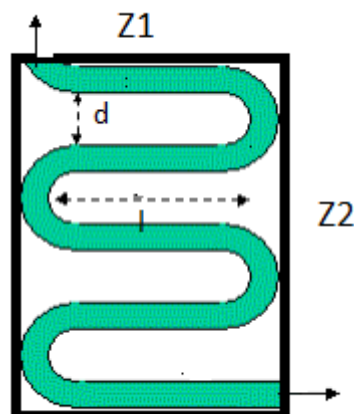


Figure II.8 : L'aérocondenseur .

La surface d'échange est la surface d'un serpentin, soit un tube cylindrique d'un diamètre  $D$  et d'une longueur  $L$ . Le tube est celui de distribution de gaz naturel, son diamètre = 0.032m.

$$A = \pi \cdot D_{\text{tuyau}} \cdot L \quad (\text{II.2})$$

Si n est le nombre de courbures :

$$1 + d/2 + d/2 = Z_1 \quad (\text{II. 3})$$

$$(n * \pi * d/2) + (n+1) * l = L = A / (\pi * D_{\text{tuyau}}) \quad (\text{II. 4})$$

$$(n * d) + (n+1) * D_{\text{tuyau}} = Z_2 \quad (\text{II. 5})$$

« n » sera solution de l'équation suivante :

$$n^2 \left[ 0.032 \left( 1 - \left( \frac{\pi}{2} \right) \right) + Z_1 \right] + \left[ Z_2 \left( \left( \frac{\pi}{2} \right) - 1 \right) + 0.032 + Z_1 - L \right] n + (0.032 - Z_2) = 0$$

(II. 6)

### a. La première disposition :

On suppose que les ventilateurs seront déposés sur deux rangées.

$$Z_1 = 2 * D + 0.05 + 0.05 + 0.1 \quad (\text{II.7})$$

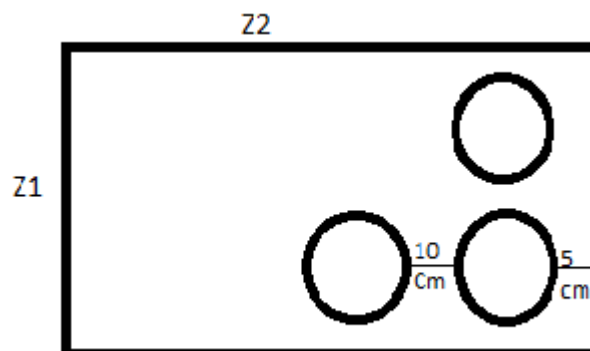
$$Z_2 = D * N' + 0.1 * (N' - 1) + 0.05 + 0.05 ; \quad (\text{II.8})$$

$$Z_1 = 2 * D + 0.2 \quad (\text{II. 9. a})$$

$$Z_2 = (D + 0.1) N' \quad (\text{II. 9. b})$$

**Tableau II.2 :** Les conditions de dimensions ; Variante 1.

	Petit Mobilab	Moyen Mobilab	Grand Mobilab
$Z_1$	$Z_1 < 2.4$	$Z_1 < 2.4$	$Z_1 < 2.4$
$D$	$D < 1.1$	$D < 1.1$	$D < 1.1$
$Z_2$	$Z_2 < 6$	$Z_2 < 9$	$Z_2 < 13.7$
$d$	$0.1 < d < Z_1$	$0.1 < d < Z_1$	$0.1 < d < Z_1$



**Figure II.9 :** Disposition des ventilateurs ; Variante 1.

### b. La deuxième disposition :

On suppose que les ventilateurs seront déposés sur 3 rangées.

$$Z_1 = 3 * D + 0.05 + 0.05 + 0.1 + 1 \quad (\text{II.10})$$

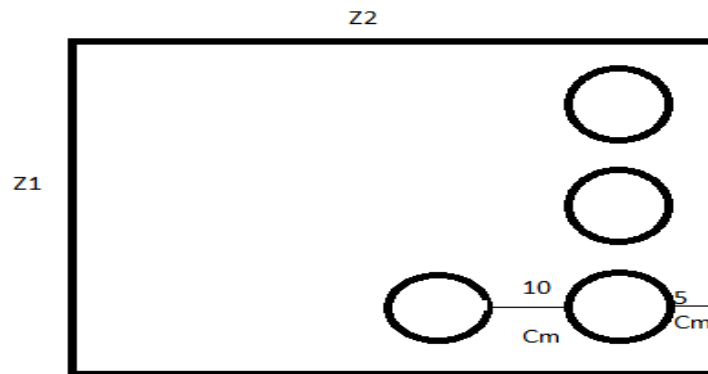
$$Z_2 = D * N' + 0.1 * (N' - 1) + 0.05 + 0.05 ; \quad (\text{II.11})$$

$$Z_1 = 3 * D + 0.3 \text{ et} \quad (\text{II.12})$$

$$Z_2 = (D + 0.1) N' \quad (\text{II.13})$$

**Tableau II.3 :** Les conditions de dimensions ; Variante 2.

	Petit Mobilab	Moyen Mobilab	Grand Mobilab
$Z_1$	$Z_1 < 2.4$	$Z_1 < 2.4$	$Z_1 < 2.4$
$D :$	$D < 0.7$	$D < 0.7$	$D < 0.7$
$Z_2$	$Z_2 < 6$	$Z_2 < 9$	$Z_2 < 13.7$
$d$	$0.1 < d < Z_1$	$0.1 < d < Z_1$	$0.1 < d < Z_1$



**Figure II.10 :** Disposition des ventilateurs ; Variante 2.

La résolution de ces systèmes des équations sera faite à l'aide d'un programme Excel détaillé en ce qui suit.



### **III. CONSTITUTION D'UNE BASE DE DONNEES ; PROGRAMME EXCEL :**

#### **III. 1 Présentation du programme de calcul EXCEL**

La solution du système décrit précédemment va permettre de retrouver la meilleure disposition des ventilateurs, et d'autre part de retrouver les domaines expérimentaux pour chaque variable. Ces résultats seront collectés dans une base de données.

On prépare un simple programme Excel sous forme de tableau pour :

- I.1** Regrouper les résultats donnés par Hysys
- I.2** Résoudre les équations de l'étape précédente.
- I.3** Vérifier les conditions à chaque fois.

Les calculs sont ainsi élaborés pour :

- I.1** «  $t_1$  » entre 20 et 30°C ;
- I.2** «  $T_2$  » entre 30 et 40°C ;
- I.3** «  $t_2$  » entre 30 et 50°C (on accepte théoriquement une température de sortie de l'air allant jusqu'à 50°C).
- I.4** Les 3 unités de Mobilab ;
- I.5** Les 2 dispositions présentées précédemment
- I.6** 12 ventilateurs dont le diamètre varie entre 0.2 et 1m et le débit entre 500 et 3000 m<sup>3</sup>/h.

Pour chaque Mobilab, et pour chaque ventilateur, on tire le domaine de température de sortie de l'air «  $t_2$  » où la solution de l'équation existe et est acceptée physiquement (conditions remplies). Ces résultats seront collectés dans une base de données.

Une feuille de calcul EXCEL ; concerne une température d'entrée de l'air  $t_1$ , allant de 20 à 30°C. Les détails sont donnés en Annexe 2.

#### **III. 2 Domaine d'utilisation de chaque ventilateur :**

Dans une feuille séparée d'Excel, sont donnés les intervalles de température de sortie de l'air pour lesquels le ventilateur est utilisable.

Par exemple :

En cas de première disposition ;

Et pour le premier Mobilab ;

Et à une température d'entrée d'air égale à 20°C ;

Et à une température de sortie d'eau égale à 30°C ;

Le premier ventilateur peut être utilisé uniquement si la température de sortie de l'air est acceptée entre 30 et 31°C.

Alors que le ventilateur 14 peut être utilisé pour une température de sortie de l'air entre 30 et 35°C.

Pour les mêmes conditions, si on accepte une température de sortie de l'eau égale à 40°C au lieu de 30°C, ces deux intervalles s'élargissent : le ventilateur N°1 aura un intervalle de 30 à 37°C, le ventilateur N°14 un intervalle peut aller de 30 jusqu'à 40°C.

### **III. 3 Intérêt de connaître le domaine de température de sortie d'air : le facteur économique**

Quand les unités de MOBILAB sont utilisées loin de la ville ; ce qui est généralement le cas ; on peut permettre une température de sortie d'air allant jusqu'à 40°C. Mais seuls certains ventilateurs offrent cette possibilité. La base de données établie nous fournit l'intervalle de température de sortie de chaque ventilateur pour chaque cas. Mais une question peut se poser : utiliser le même ventilateur à une température de sortie d'air 30°C ou 40°C, en quoi ça diffère ?

En effet, la puissance consommée est un facteur important dans l'étude économique de notre système de ventilation.

Cette puissance varie directement avec le débit d'air nécessaire. Ce débit ; comme sera prouvé dans la modélisation mathématique ; dépend principalement de deux facteurs : la température d'entrée de l'air, et sa température de sortie, (la température de sortie de l'eau influe légèrement).

Comme l'air passe par le ventilateur sans subir aucun refroidissement préalable, on ne peut jouer sur sa température d'entrée qui sera prise comme une contrainte. Cependant on peut gagner beaucoup en termes de puissance en changeant la température de sortie de l'air. Cela sera détaillé ultérieurement.

### **III. 4 Intérêt de la température de sortie de l'eau : la surface d'échange :**

Une analyse des résultats nous permet de dire que c'est un facteur peu influant sur le débit de l'air nécessaire, et par conséquent sur la puissance. Par contre, la variation de la température engendre un gain de surface d'échange. Pour une température d'entrée d'air =20°C, et une température de sortie d'air de 30°C ; le passage d'une température de sortie d'eau de 30 à 40°C fait gagner 36 % sur la surface.

#### IV. LE CHOIX DE VENTILATEUR ET CALCUL DE PUISSANCE :

##### IV.1 Le choix de ventilateur et de configuration :

Lors du choix de notre ventilateur ; deux facteurs sont à considérer :

- L'intervalle d'utilisation, un ventilateur qui permet son usage quelque soit la température d'entrée de l'air.
- Le facteur économique : un ventilateur qui ne nécessite pas un grand apport de puissance, (autrement dit qui permet des températures de sortie d'air relativement élevées).

Une comparaison des résultats permet de tirer les ventilateurs fonctionnant à des intervalles de températures plus larges.

- Pour le premier Mobilab ; le ventilateur 4.
- Pour le deuxième Mobilab, le ventilateur 6.
- Pour le deuxième Mobilab, le ventilateur 6.

Le choix de la configuration et de système de disposition :

- Choix de la disposition :  
 Dans notre cas nous devons aussi choisir une disposition : ventilateurs sur deux rangées (1ère disposition) ; ou ventilateurs sur trois rangées (2ème disposition).  
 En effet, la deuxième disposition élargit les domaines d'utilisation, par exemple à une température d'entrée d'air=30°C, la première disposition n'offre aucune solution avec le ventilateur N°14 ; par contre la solution est possible avec la deuxième disposition.

**Tableau II.4** : Les caractéristiques de ventilateur choisi pour chaque Mobilab

<b>MOBILAB 1</b>	<b>MOBILAB 2</b>	<b>MOBILAB 3</b>
Ventilateur choisi N° 4	Ventilateur choisi N° 6	Ventilateur choisi N° 6
Débit: 5000 m <sup>3</sup> /h	Débit: 4500 m <sup>3</sup> /h	Débit: 4500 m <sup>3</sup> /h
Diamètre: D=0,72 m	Diamètre: D=0,68 m	Diamètre: D=0,68 m
Vitesse faciale: 3.41 m/s	Vitesse faciale: 3,44 m/s	Vitesse faciale: 3,44 m/s
U = 3133,36 KJ/h.m <sup>2</sup> .°C	U = 3158,61 KJ/h.m <sup>2</sup> .°C	U = 3158,61 KJ/h.m <sup>2</sup> .°C
Nbre de ventilateurs 12	Nbre de ventilateurs 27	Nbre de ventilateurs 51
Surface d'échange A= 4.5 m <sup>2</sup>	Surface d'échange A= 8,9 m	Surface d'échange A= 17,8 m
Longueur de tube L =54 m	Longueur de tube L = 88,4 m	Longueur de tube L = 176,83 m
Z <sub>1</sub> = 2.46m	Z <sub>1</sub> = 2,43 m	Z <sub>1</sub> = 2,43 m
Z <sub>2</sub> =3.28 m	Z <sub>2</sub> =7,02 m	Z <sub>2</sub> =13,3 m
n= 17	n= 36	n= 72
d=0,17 m	d=0,16 m	d=0,16 m
l = 2.3 m	l = 2,17 m	l = 2,2 m

- La surface d'échange :  
La règle suivie pour le choix de la surface d'échange est « qui peut le plus peut le moins », on fixe donc la surface d'échange A à la plus grande valeur obtenue avec un ventilateur donné.
- La configuration finale :  
La surface d'échange étant choisie, les paramètres fixant la configuration finale sont déterminés au moyen des équations de calculs données précédemment.

#### IV.2 Détermination des besoins de chaque ventilateur :

Notre besoin réel en énergie ou l'énergie requise est donné par la chaleur cédée par la vapeur d'eau en se condensant et se refroidissant. Cette valeur est fournie par le Hysys qui prend en considération un facteur de correction lors du calcul.

La puissance absorbée du ventilateur peut être calculée en Cheval Vapeur par la formule suivante [24]:

$$P = \frac{Q}{1061 V_f (t_2 - t_1)} \quad (\text{II.14})$$

La puissance en Cheval Vapeur : 1CV = 736 Watt.

Notons que Q ici est donnée en Kcal /h.

**Tableau II.5** : La chaleur échangée par chaque Mobilab en Kcal/h.

		Mobilab 1	Mobilab 2	Mobilab 3
Débit vapeur (kg/h)	1	50	100	200
Q (Kcal/h)	612,3	30 615	61 230	122 460

- **Méthode de détermination des besoins mensuels :**

Pour chaque mois de l'année, nous considérons une température moyenne mensuelle, qui va être égale à la température d'entrée de l'air.

Le calcul de puissance est ensuite fait pour chaque mois pour différentes températures de sortie de l'air t2. Comme choix final, nous prenons le cas le plus défavorable soit la température de sortie d'air la plus basse.

Par exemple, pour le Mobilab 1, la puissance requise à une température d'entrée égale à 20°C varie entre 4.98 KWh/jour (T sortie de l'air 30°C) et 2.49 KWh/jour (T sortie de l'air 40°C). Nous considérons 4.98 KWh.

## V. MODELISATION MATHEMATIQUE :

Les plans d'expériences permettent d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique ou des études industrielles .Ils sont applicables à de nombreuses disciplines et à toutes les industries à pour chercher le lien qui existe entre une grandeur d'intérêt,  $y$ , et des variables,  $x_i$  [62-64].

De ce fait, nous établissons un plan d'expériences dont le but est d'avoir un modèle mathématique interprétant le débit  $D_2$  et le produit UA, en fonction des trois facteurs (température d'entrée et de sortie de l'air, température de sortie de l'eau).

### V.1 La planification factorielle : établissement d'un modèle linéaire :

#### a. Avantages de cette étape :

Bien que rien ne nous garantit que le modèle linéaire est vérifié ; l'établissement de ce dernier permet de donner une idée de l'ordre de grandeur de paramètre associé à chaque facteur, et à leurs interactions.

**Tableau II.6** : Matrice des expériences et résultats

Essai N°	Facteur 1 $t_1$	Facteur 2 $t_2$	Facteur 3 $T_2$	Réponse 1 UA	Réponse 2 $D_2$
1	20	32	30	4 451,53	8 966,43
2	30	32	30	14 037,19	54 687,16
3	20	50	30	8 122,13	3 693,12
4	30	50	30	18 631,17	5 628,22
5	20	32	40	3 231,55	8 818,49
6	30	32	40	4 015,33	53 784,86
7	20	50	40	4 609,19	3 632,18
8	30	50	40	6 107,64	5 535,36
9	25	41	35	5 106,83	6 823,51

Essai N°	Facteur 1 $t_1$	Facteur 2 $t_2$	Facteur 3 $T_2$	Réponse 1 UA	Réponse 2 $D_2$
1	-1	-1	-1	4 451,53	8 966,43
2	+1	-1	-1	14 037,19	54 687,16
3	-1	+1	-1	8 122,13	3 693,12
4	+1	+1	-1	18 631,17	5 628,22
5	-1	-1	+1	3 231,55	8 818,49
6	+1	-1	+1	4 015,33	53 784,86
7	-1	+1	+1	4 609,19	3 632,18
8	+1	+1	+1	6 107,64	5 535,36
MOY	0	0	0	7 900,72	18 093,23

### b. Etablissement de matrice d'expériences :

Le modèle linéaire est le plus simple à établir, il consiste à choisir 2 niveaux pour chaque facteur ; soit la valeur min et la valeur max de ce dernier dans notre cas.

L'équation sera de type :

$$Y=y_0+a_1*x_1+a_2*x_2+a_3*x_3+a_{12}*x_1*x_2+a_{13}*x_1*x_3+a_{23}*x_2*x_3+a_{123}*x_1*x_2*x_3 \quad (II.15)$$

«  $y_0$  » est prise égale à la moyenne des valeurs des 8 essais précédent ; le test de la linéarité et la validation du modèle est la comparaison de cette valeur avec la valeur expérimentale (essai 9). Pour cela on calcule le pourcentage R :

$$R= (y_9-y_0)/y_9 \quad (II.16)$$

## V.2 Analyse des résultats :

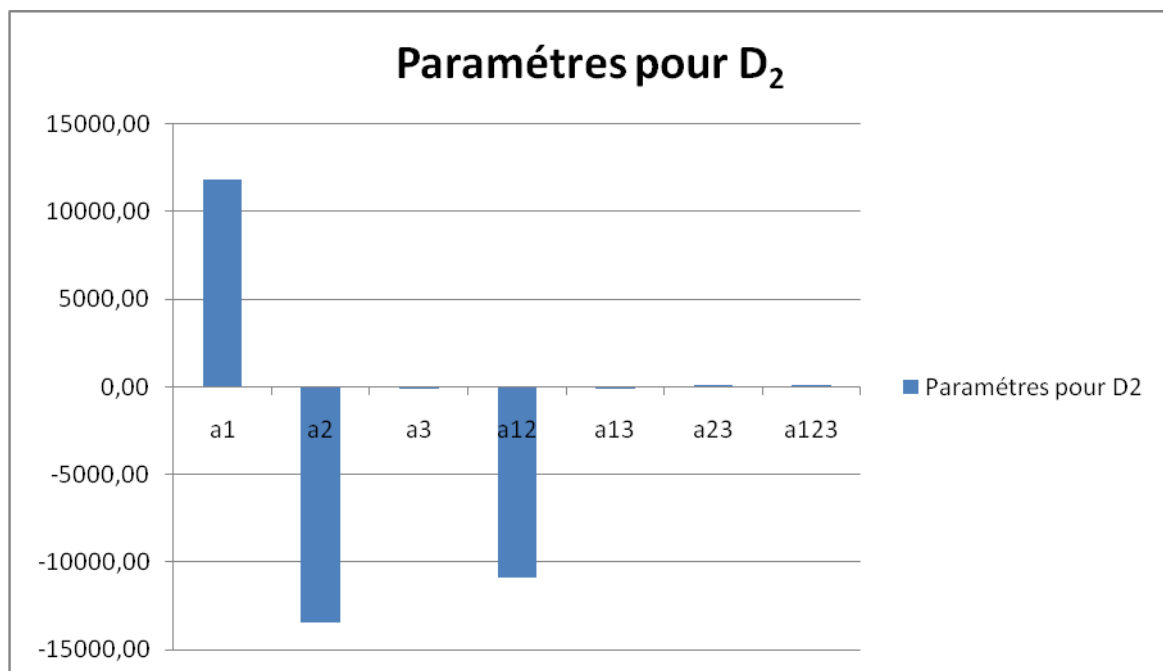
### a. Le débit $D_2$ :

Pour le débit  $D_2$  ; les valeurs des résultats sont données dans le tableau suivant :

**Tableau II.7** : Effets et interactions des facteurs (Réponse=  $D_2$ ).

$Y_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{23}$	$a_{123}$	R
18093,23	11815,67	-13471,01	-150,51	-10856,10	-98,29	112,06	90,30	165,16%

Commençons d'abord par la représentation graphique des paramètres pour la comparaison des valeurs de ces derniers :

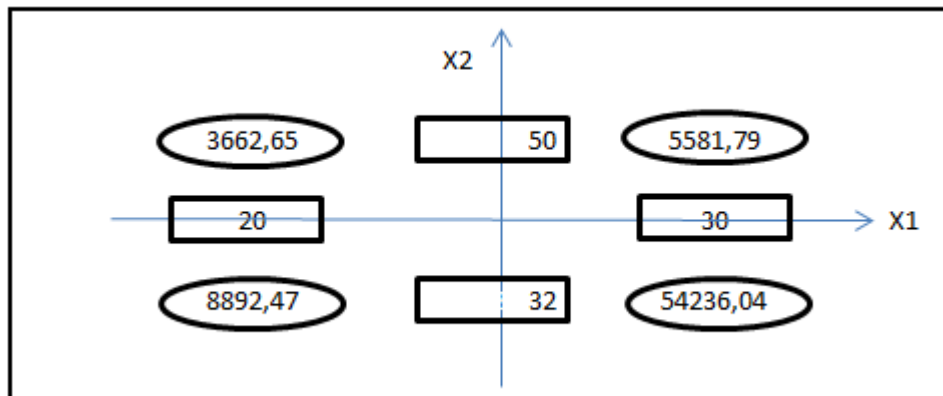


**Figure II.11** : Illustration du tableau II.7 : comparaison entre les paramètres.

Il est clair que le facteur  $x_3$  ( $T_2$  : température de sortie de l'eau) n'a presque aucun effet sur la réponse  $D_2$  (le débit de l'air) devant les deux autres facteurs.

Les deux facteurs  $x_1$  ( $t_1$  : température d'entrée de l'air), et  $x_2$  ( $t_2$  : température de sortie de l'air) ont « un poids » presque égal mais de signes opposés. L'effet du facteur  $x_1$  est positif : la réponse  $D_2$  augmente quand  $x_1$  augmente ; tandis que l'effet du facteur  $x_2$  est négatif : la réponse  $D_2$  diminue quand le facteur  $x_2$  augmente.

Concernant les interactions ; uniquement l'interaction entre  $x_1$  et  $x_2$  a un poids significatif ; les autres interactions de  $x_3$  avec  $x_1$  ou  $x_2$  sont négligeables ; il en est de même pour l'interaction d'ordre 3.



**Figure II.12** : Signification de l'interaction  $a_{12}$

Ce carré est obtenu de la façon suivante : chaque sommet du carré (ellipse) représente une combinaison des deux facteurs  $x_1$  et  $x_2$ . Par exemple, en haut à droite c'est la valeur moyenne de  $D_2$  lorsque  $x_1$  et  $x_2$  sont les deux au niveau supérieur, soit les deux essais 4 et 8 de la matrice.

L'effet de  $x_1$  est positif ; la réponse augmente quand  $x_1$  passe de son niveau bas à son niveau sup mais cette augmentation est plus importante lorsque le facteur  $x_2$  est à son niveau inférieur : plus  $x_2$  augmente plus l'influence de  $x_1$  diminue.

L'effet de  $x_2$  est négatif; la réponse diminue quand  $x_2$  passe de son niveau bas à son niveau sup mais cette diminution est plus importante lorsque le facteur  $x_1$  est à son niveau supérieur : plus  $x_1$  augmente plus l'influence de  $x_2$  augmente.

La valeur de l'erreur prouve l'invalidité du modèle linéaire ; un modèle de second degré va être établi plus tard.

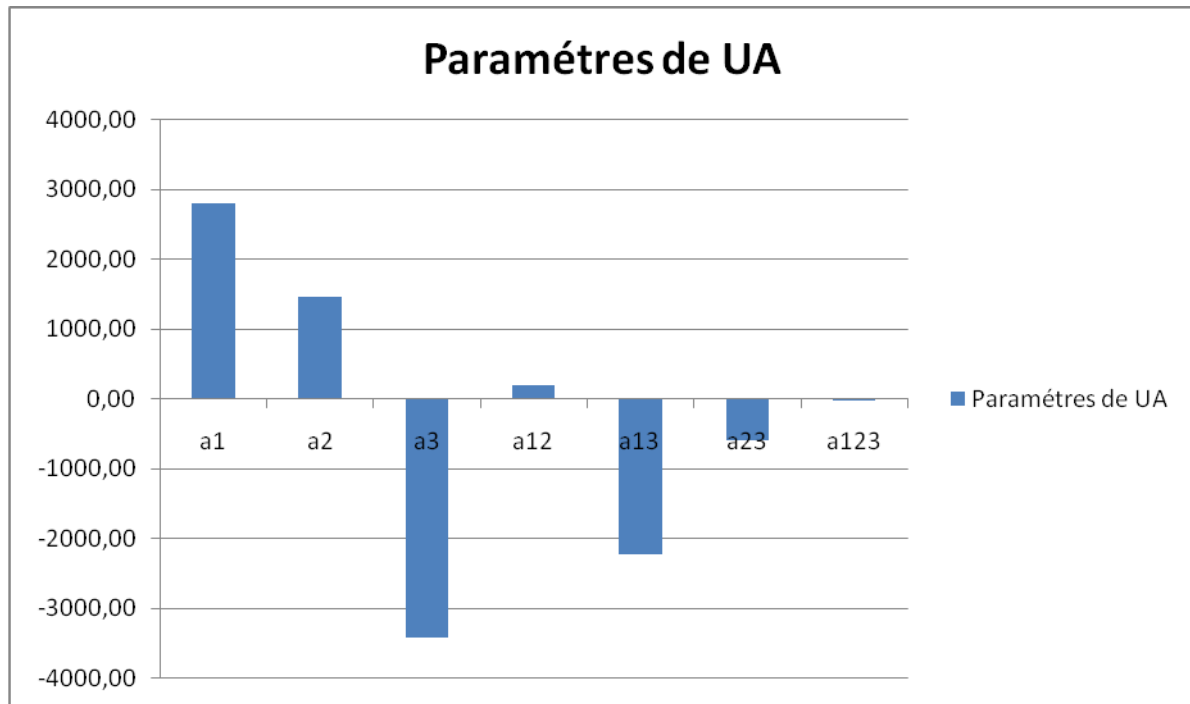
**b. Le produit UA :**

Pour le produit UA les valeurs des résultats sont données dans le tableau suivant :

**Tableau II.8** : Effets et interactions des facteurs (Réponse= UA).

Y0	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>12</sub>	a <sub>13</sub>	a <sub>23</sub>	a <sub>123</sub>	R
7 900,72	2797,12	1466,82	-3409,79	204,76	-2226,56	-599,33	-26,09	54,71%

Commençons d'abord par la représentation graphique des paramètres pour la comparaison des valeurs de ces derniers :



**Figure II.13** : Illustration du tableau II.8 : comparaison entre les paramètres.

Bien que le poids du facteur  $x_3$  est le plus important ; les deux autres facteurs restent influents. Seul  $x_3$  a un effet négatif sur la réponse. Les interactions de 2<sup>nd</sup> degrés sont aussi de valeurs significatives.

### V.3 Modèle mathématique de 2<sup>nd</sup> degrés :

Le modèle de seconds degrés nécessite l'utilisation d'un logiciel adéquat, nous utiliserons ici le logiciel SIGMA Plot.

#### a. Présentation du logiciel SIGMA PLOT :

Sigma Plot est un logiciel scientifique de statistique et de représentation graphique. Lors de l'utilisation de Sigma Plot, plusieurs paramètres nous permettent de vérifier la validité de notre modèle, il s'agit principalement de  $R^2$  et P-value [65].

$R^2$  est le coefficient de détermination, c'est la valeur la plus importante pour prouver la validité du model. Plus  $R^2$  est proche de 1, plus les variables indépendantes peuvent prédire la variable dépendante. Si  $R^2$  est égal à 0, la variable dépendante ne peut être prédite par les variables indépendantes.



La p -value est la probabilité qu'un coefficient soit négligeable. Elle doit être inférieure à une valeur déterminée préalablement par l'utilisateur, ou donnée par défaut par SigmaPlot.

**b. Etablissement d'un modèle pour le débit D<sub>2</sub>:**

Puisque le modèle linéaire est non valide, on pense à établir un modèle de 2nd degrés mais à deux facteurs uniquement soit x<sub>1</sub> et x<sub>2</sub> ; car le x<sub>3</sub> n'a presque aucune influence sur la réponse, comme prouvé à partir du modèle linéaire.

A chaque couple x<sub>1</sub>, x<sub>2</sub> ; nous associons une réponse y=D<sub>2</sub> égale à la moyenne des valeurs de y pour chaque x<sub>3</sub>.

$$D_2(x_1,x_2)=[ D_2(x_1,x_2, x_3=30^{\circ}\text{C})+ D_2(x_1,x_2,x_3=35^{\circ}\text{C})+ D_2(x_1,x_2,x_3=40^{\circ}\text{C})]/3 \quad (\text{II.17})$$

Le modèle que nous cherchons à établir est de la forme :

$$Y=a_1*x_1+a_2*x_2+ a_{11}*x_1^2+a_{22}*x_2^2+a_{12}*x_1*x_2$$

(Le « y<sub>0</sub> » disparaît car nous n'allons pas passer par les variables centrées réduites)

Les essais sont effectués sur différents intervalles, nous cherchons à optimiser le modèle en minimisant la valeur des erreurs tout en gardant un intervalle large.

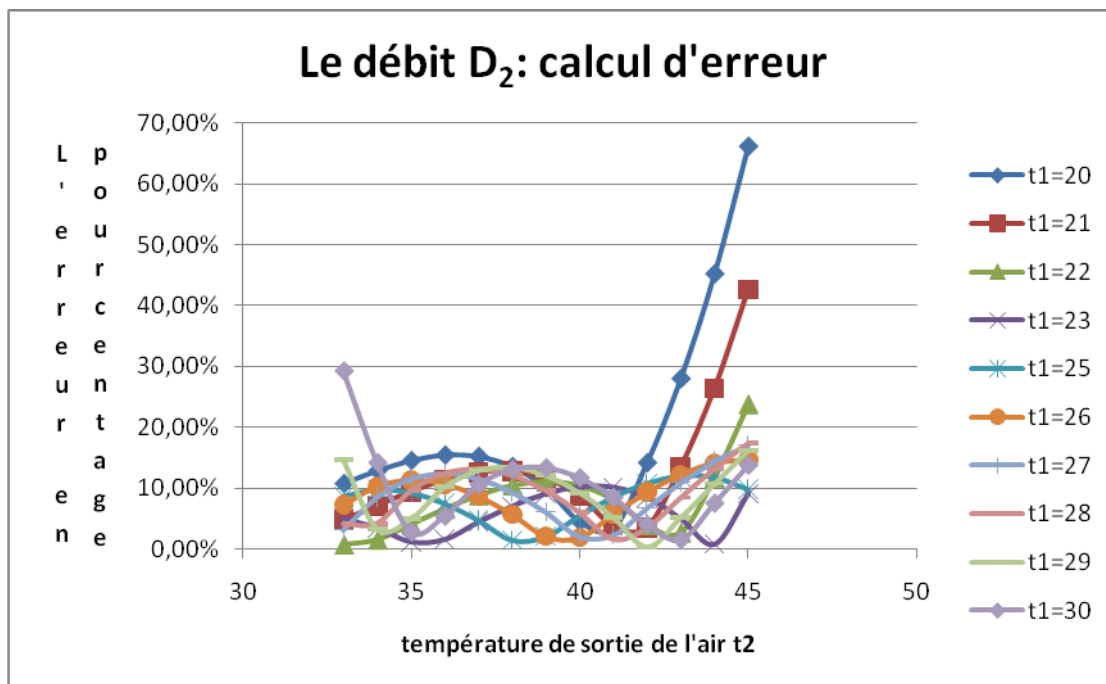
On choisit finalement l'intervalle t<sub>2</sub> de 32 à 45 °C.

**Tableau II.9 :** Effets et interactions des facteurs (Réponse= D<sub>2</sub>) ; modèle 2<sup>nd</sup> degrés.

D <sub>2</sub> =a <sub>1</sub> *t <sub>1</sub> +a <sub>2</sub> *t <sub>2</sub> + a <sub>11</sub> *t <sub>1</sub> <sup>2</sup> +a <sub>22</sub> *t <sub>2</sub> <sup>2</sup> +a <sub>12</sub> *t <sub>1</sub> *t <sub>2</sub>					
R <sup>2</sup> = 0.9224 et P-Value <0,0001					
MOBILAB 1					
Paramètre	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>11</sub>	a <sub>22</sub>	a <sub>12</sub>
Valeur	3402,75	-1542,55	73,88	60,61	-159,64
MOBILAB 2					
Paramètre	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>11</sub>	a <sub>22</sub>	a <sub>12</sub>
Valeur	6805,49	-3085,09	147,76	121,21	-319,28
MOBILAB 3					
Paramètre	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>11</sub>	a <sub>22</sub>	a <sub>12</sub>
Valeur	13610,98	-6170,18	295,51	242,42	-638,57

Le coefficient de détermination est de 0.92 ; le modèle peut être acceptable. Les valeurs de P-value sont proches de zéro, ceci montre que les paramètres sont indépendants.

Les valeurs des erreurs sont données dans le graphe suivant :



**Figure II.14 :** les erreurs relatives à l’application du modèle de 2<sup>nd</sup> degrés (réponse =D<sub>2</sub>)

**c. Etablissement d’un modèle pour UA:**

Puisque le modèle linéaire est non valide, on pense à établir un modèle de 2<sup>nd</sup> degrés à trois facteurs (les trois facteurs sont influençant d’après le modèle linéaire).

On teste plusieurs modèles sur différents intervalles, toujours avec le logiciel Sigma Plot, nous choisissons à la fin :

$$Y = a_{11} * x_1^2 + a_{22} * x_2^2 + a_{33} * x_3^2 + a_{12} * x_1 * x_2 + a_{13} * x_1 * x_3 + a_{23} * x_2 * x_3$$

**Tableau II.10 :** Effets et interactions des facteurs (Réponse= UA) ; modèle 2<sup>nd</sup> degrés.

U*A						
R2=0,85 & P-value <0,0001						
UA= a <sub>11</sub> *t <sub>1</sub> <sup>2</sup> +a <sub>22</sub> *t <sub>2</sub> <sup>2</sup> + a <sub>33</sub> *T <sub>2</sub> <sup>2</sup> +a <sub>12</sub> *t <sub>1</sub> *t <sub>2</sub> + a <sub>13</sub> *t <sub>1</sub> *T <sub>2</sub> + a <sub>23</sub> *t <sub>2</sub> *T <sub>2</sub>						
MOBILAB 1						
Paramètre	a <sub>11</sub>	a <sub>22</sub>	a <sub>33</sub>	a <sub>12</sub>	a <sub>13</sub>	a <sub>23</sub>
Valeur	36,88	54,69	10,35	-78,6	-24,63	11,97
MOBILAB 2						
Paramètre	a <sub>11</sub>	a <sub>22</sub>	a <sub>33</sub>	a <sub>12</sub>	a <sub>13</sub>	a <sub>23</sub>
Valeur	73,77	109,37	20,7	-157,2	-49,26	23,93
MOBILAB 3						
Paramètre	a <sub>11</sub>	a <sub>22</sub>	a <sub>33</sub>	a <sub>12</sub>	a <sub>13</sub>	a <sub>23</sub>
Valeur	147,53	218,74	41,4	-314,4	-98,52	47,86

Les valeurs des erreurs sont données dans le graphe suivant :

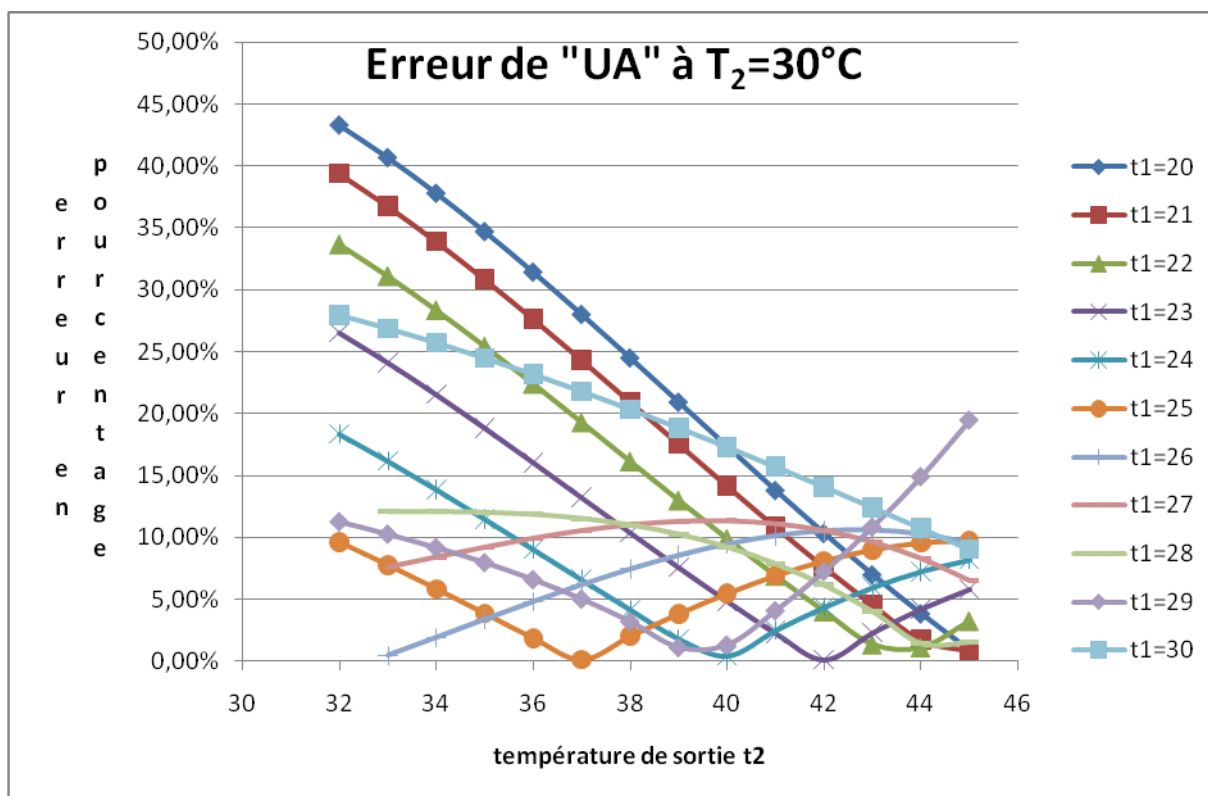


Figure II.15 : les erreurs relatives à l'application du modèle de 2<sup>nd</sup> degrés (réponse =UA)

## **PARTIE B : DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE :**

---

### **I. INTRODUCTION :**

En Algérie, qui dispose d'un gisement solaire prometteur, la technologie solaire photovoltaïque présente une convenance particulière pour alimenter l'aérocondenseur utilisé dans des unités mobiles. Pour cela ; un pré dimensionnement de système et une analyse de rentabilité économique sont nécessaires [47 ; 50-52 ; 55].

Cette partie passe par deux étapes :

- **1ère étape :** Etude de variation de la puissance consommée par le ventilateur le long de l'année.
- **2ème étape :** Etude de la possibilité d'autonomie énergétique : comparaison potentiel solaire- besoin en puissance.

La technologie solaire peut apporter une réponse appropriée à la question de la fourniture en énergie de notre aérocondenseur. Dans ce qui suit, nous essayons de répondre à deux questions ; la première est l'autonomie énergétique. La deuxième est une analyse de rentabilité économique.

### **II. DIMENSIONNEMENT AVEC LE LOGICIEL PV-GIS:**

#### **II.1 Présentation du logiciel :**

Beaucoup de sociétés, entreprises et centres de recherche travaillant dans ce domaine, développent leurs propres bases de données, et méthode de dimensionnement. Quelques uns les laissent accessibles au grand public.

Le centre européen de recherche (Joint Research Center) ; sis en Italie ; met en ligne le PV-GIS (Photovoltaic Geographical Information System) [66]. Ce logiciel peut fournir le gisement solaire utilisant Google maps pour se situer, calculer l'irradiation selon le lieu et les paramètres d'inclinaison et d'orientation et déterminer la production en électricité d'un système photovoltaïque de caractéristiques connues.

#### **II.2 Application de PV-GIS:**

Cette application commence par le choix d'un lieu (Figure II.16).

##### **a. L'irradiation solaire :**

Le logiciel PV GIS pourra fournir l'irradiation mensuelle (ou quotidienne) de la ville choisie. Il suffit juste de spécifier l'inclinaison (Figure II.16), il donnera même l'irradiation optimale à inclinaison optimale.

Le tableau II.11 illustre le rapport affiché.

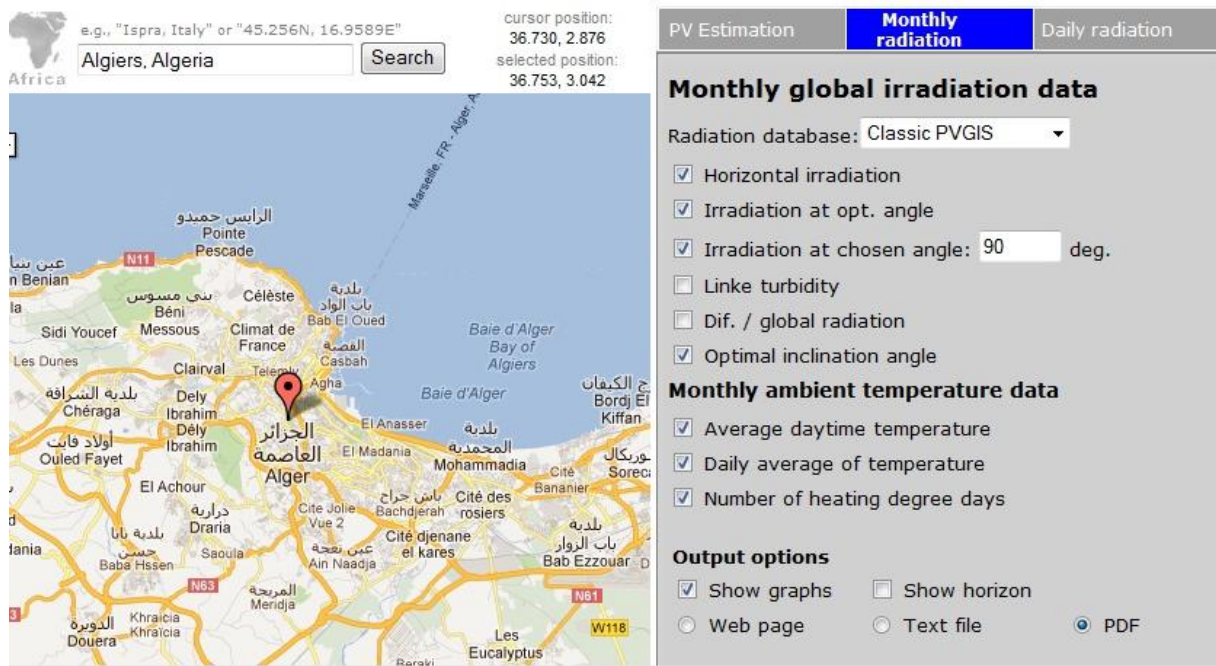


Figure II.16 : Choix de la ville d'Alger sur l'interface de PV-GIS.

Tableau II.11 : L'irradiation solaire mensuelle sur la ville d'Alger.

Mois	H Hor	Hopt	H (90)	I Opt
Jan	2,29	3,5	3,39	59
Fev	3,1	4,25	3,64	51
Mar	4,24	5,06	3,54	39
Avr	5,29	5,58	2,98	23
Mai	6,36	6,1	2,52	10
Jun	6,94	6,36	2,25	3
Jul	6,88	6,45	2,41	7
Aug	6,29	6,4	3,03	18
Sep	4,98	5,74	3,65	34
Oct	3,77	5	4,02	48
Nov	2,5	3,71	3,45	57
Dec	2,08	3,31	3,31	61
<b>Annuel</b>	<b>4,57</b>	<b>5,13</b>	<b>3,18</b>	<b>32</b>

### b. La production de l'électricité :

L'électricité produite par un panneau photovoltaïque dépend des caractéristiques de ce dernier. Nous faisons donc entrer les paramètres du module photovoltaïque utilisé :

- La puissance unitaire de module ; Watt Crête ou Watt peak : comme définie précédemment, c'est la puissance maximale pouvant être fournie dans les conditions d'ensoleillement standard (Ensoleillement de 1000 W/m<sup>2</sup>; Panneaux à 25°C) ; les modules utilisés sont de puissance crête 200 Wh/ m<sup>2</sup>. Cela veut dire qu'ils sont de rendement égal à 20 % (si les pertes de système ne sont pas considérées).  
Notons toutefois que cette valeur est juste indicative, l'ensoleillement varie de façon continue. A Alger, il dépasse souvent les 1000 W/m<sup>2</sup>.
- Les pertes de système : nous considérons le pourcentage par défaut pris par le logiciel.  
Les pertes dues à la température : 11.9%.  
Les pertes dues à l'angle de réflexion : 2.5%.  
Autres pertes : 14%.  
Pertes du système combinées : 26.1%.
- L'inclinaison : le logiciel peut opter pour un optimal pour la ville choisie ; soit 32°.
- L'orientation des modules : le logiciel propose une inclinaison optimale pour chaque lieu. Ainsi une inclinaison nulle est donnée pour Alger.

Après introduction de ces données, le logiciel donnera le rapport d'électricité produite.

**Tableau II.12** : L'électricité produite (par surface unitaire du système à installer).

<b>inclinaison=32°, orientation=0°</b>				
<b>Mois</b>	$E_d$	$E_m$	$H_d$	$H_m$
Jan	0,55	17.1	3.50	109
Fev	0,66	18.5	4.25	119
Mar	0,76	23.6	5.06	157
Avr	0,83	25.0	5.58	167
Mai	0,89	27.6	6.10	189
Jun	0,91	27.3	6.36	191
Jul	0,91	28.3	6.45	200
Aug	0,9	27.9	6.40	198
Sep	0,83	24.9	5.74	172
Oct	0,74	22.8	5.00	155
Nov	0,57	17.0	3.71	111
Dec	0,52	16.0	3.31	102
<b>Annuel</b>	<b>0,756</b>	<b>23.0</b>	<b>5.13</b>	<b>156</b>
<b>Total</b>		<b>276</b>		<b>1870</b>

### III. DETERMINATION DE LA SURFACE DES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES :

#### III. 1 Calcul de la surface :

La puissance nécessaire à l'alimentation du ventilateur a été déterminée en fonction des différentes températures d'entrée et de sortie de l'air.

Ayant les courbes de températures le long des jours de l'année, nous pouvons déterminer la variation de la température d'entrée de l'air, et par conséquent la puissance recommandée par le ventilateur pour chaque jour. Nous pouvons aussi faire les études sur les semaines en déterminons la température moyenne par semaine.

Ayant eu les températures moyennes par mois de la ville d'Alger [67], nous travaillons dans la suite par mois.

- Pour chaque mois; la température d'entrée de l'air est prise égale à la température moyenne du mois.
- Calculer la puissance par l'équation (II.14) et la convertir en KW/h.
- Calculer le besoin journalier du mois en multipliant la puissance par 8 (8 heures de travail par jour).
- La surface du panneau Photovoltaïque est le rapport entre la quantité fournie des panneaux [KWh/Jour. m<sup>2</sup>] et le besoin journalier [KWh/Jour].

**Tableau II.13** : Besoin journalier en énergie et surface nécessaire des panneaux photovoltaïques de chaque Mobilab.

Mois	Fourniture des panneaux KWh/Jour.	Tre de mois	MOBILAB 1		MOBILAB 2		MOBILAB 3	
			Besoin journalier du mois	Surface nécessaire (S <sub>p</sub> : m <sup>2</sup> )	Besoin journalier du mois	Surface nécessaire (S <sub>p</sub> : m <sup>2</sup> )	Besoin journalier du mois	Surface nécessaire (S <sub>p</sub> : m <sup>2</sup> )
			Jan	0,55	20	4,98	9,05	9,87
Feb	0,66	20	4,98	7,55	9,87	14,95	19,74	29,91
Mar	0,76	20	4,98	6,55	9,87	12,99	19,74	25,97
Apr	0,83	21	5,53	6,66	10,97	13,22	21,94	26,43
May	0,89	24	8,3	9,33	16,45	18,48	32,9	36,97
Jun	0,91	27	16,6	18,24	32,91	36,16	65,82	72,33
Jul	0,91	30	24,9	27,36	49,36	54,24	98,72	108,48
Aug	0,9	30	24,9	27,67	49,36	54,84	98,72	109,69
Sep	0,83	29	24,9	30,00	49,36	59,47	98,72	118,94
Oct	0,74	25	9,96	13,46	19,74	26,68	39,48	53,35
Nov	0,57	21	5,53	9,70	10,97	19,25	21,94	38,49
Dec	0,52	20	4,98	9,58	9,87	18,98	19,74	37,96

• **Analyse des résultats:**

La surface nécessaire diffère énormément d'un mois à un autre. Bien que l'irradiation solaire soit maximale en mois de Juillet, Août et Septembre, la surface nécessaire est

aussi maximale durant ces mois ci. Cela est dû au fait que la température élevée de l'air engendre un grand besoin durant ces mois. Et aussi à l'effet de la température sur les panneaux solaires.

### III. 2 Conception des panneaux :

Les panneaux solaires dimensionnés vont être placés sur le toit du Mobilab considéré. Ce qui rend la surface exploitable limitée.

Le tableau II.14 donne la surface exploitable pour chaque Mobilab.

**Tableau II.14.** La surface exploitable pour chaque Mobilab

	1 <sup>er</sup> Mobilab	2 <sup>ème</sup> Mobilab	3 <sup>ème</sup> Mobilab
Surface (M2)	14.5	22	33
Nombre des panneaux installés	15	22	33

Ayant la surface nécessaire et la surface disponible, nous pouvons avoir l'apport énergétique du panneau solaire pour chaque mois. (Tableau II.15).

- **Analyse du tableau II.15 :**

Le Mobilab 3 n'assure son autosuffisance que durant 3 mois de l'année. Son plus bas niveau est enregistré durant le mois de Septembre (28%).

Pour le Mobilab 1 et 2, l'autosuffisance en énergie est assurée du mois d'Octobre au mois de Mai. Durant les mois restants, les panneaux solaires ne fournissent pas assez pour satisfaire les besoins, cependant leur apport reste toujours considérable et près de la moitié (58% pour le 1<sup>er</sup> Mobilab, 45 % pour le 2<sup>ème</sup> Mobilab).

Toutefois, cela ne veut pas dire que le photovoltaïque n'est pas suffisant. Pour le premier Mobilab par exemple, le taux annuel est de couverture est de 132%, ce qui prouve qu'un bon stockage de l'énergie peut nous assurer l'autosuffisance de ce Mobilab.

Nous nous sommes toujours placés au cas le plus défavorable, et nous avons calculé l'énergie électrique restant à fournir et son coût.



**Tableau II.15 : Contribution mensuelle de l'énergie solaire pour le recouvrement de la consommation des ventilateurs**

	Mobilab 1					Mobilab 2				Mobilab 3					
	Fourniture des panneaux KWh/ jour	Fourniture des panneaux installés KWh/ jour	Consommation des ventilateurs KWh/ jour	Pourcentage d'apport des panneaux .	Reste à fournir KWh/jour	Consommation des ventilateurs KWh/ jour	Fourniture des panneaux installés KWh/ jour	Pourcentage d'apport des panneaux .	Reste à fournir KWh/jour	Consommation des ventilateurs KWh/ jour	Fourniture des panneaux installés KWh/ jour	Pourcentage d'apport des panneaux .	Reste à fournir KWh/jour		
Jan	0,55	7,98	4,98	160%	0	9,87	12,1	123%	0	19,74	18,15	92%	1,59		
Feb	0,66	9,57	4,98	192%	0	9,87	14,52	147%	0	19,74	21,78	110%	0		
Mar	0,76	11,02	4,98	221%	0	9,87	16,72	169%	0	19,74	25,08	127%	0		
Apr	0,83	12,04	5,53	218%	0	10,97	18,26	166%	0	21,94	27,39	125%	0		
May	0,89	12,91	8,3	155%	0	16,45	19,58	119%	0	32,9	29,37	89%	3,53		
Jun	0,91	13,20	16,6	79%	3,41	32,91	20,02	61%	12,89	65,82	30,03	46%	35,79		
Jul	0,91	13,20	24,9	53%	11,71	49,36	20,02	41%	29,34	98,72	30,03	30%	68,69		
Aug	0,9	13,05	24,9	52%	11,85	49,36	19,8	40%	29,56	98,72	29,7	30%	69,02		
Sep	0,83	12,04	24,9	48%	12,87	49,36	18,26	37%	31,10	98,72	27,39	28%	71,33		
Oct	0,74	10,73	9,96	108%	0	19,74	16,28	82%	0	39,48	24,42	62%	15,06		
Nov	0,57	8,27	5,53	149%	0	10,97	12,54	114%	0	21,94	18,81	86%	3,13		
Dec	0,52	7,54	4,98	151%	0	9,87	11,44	116%	0	19,74	17,16	87%	2,58		
Annuel	En KWh				1218	En KWh				3146	En KWh				8173
8 mois/ an	En KWh				1218	En KWh				3146	En KWh				8123
Coût	(1.815 DZD/ KWh)				2211					5710					14 744

## ***PARTIE C : ETUDE ECONOMIQUE***

Lors de la mise en œuvre d'un nouveau procédé, le souci majeur d'un ingénieur reste la possibilité de son application à l'échelle industrielle, soit l'étude de sa faisabilité. Cela commence par une étude de marché. Ensuite, une estimation du coût de projet et du délai de sa récupération [14 ; 59].

### **I. CALCUL DU COUT DE PROJET DE L'UNITE MOBILE :**

Notre étude technique est focalisée sur l'aérocondenseur et le kit photovoltaïque qui servira à son alimentation; cependant, pour une bonne étude économique, nous devons avoir une idée globale sur le coût de l'installation, tout équipement compris. Dans ce qui suit nous estimons les coûts de l'aérocondenseur et l'installation photovoltaïque ; pour le matériel restant nous ferons recours aux études menées préalablement.

#### **I.1 Estimation du coût de l'aérocondenseur :**

Pour l'estimation du prix, la méthode de pré-estime de l'IFP [24] est utilisée. Nous commençons d'abord par estimer le prix de base.

$$P_b \text{ (pour l'année 2000)} = 0.35 * C * S \quad (\text{II.18})$$

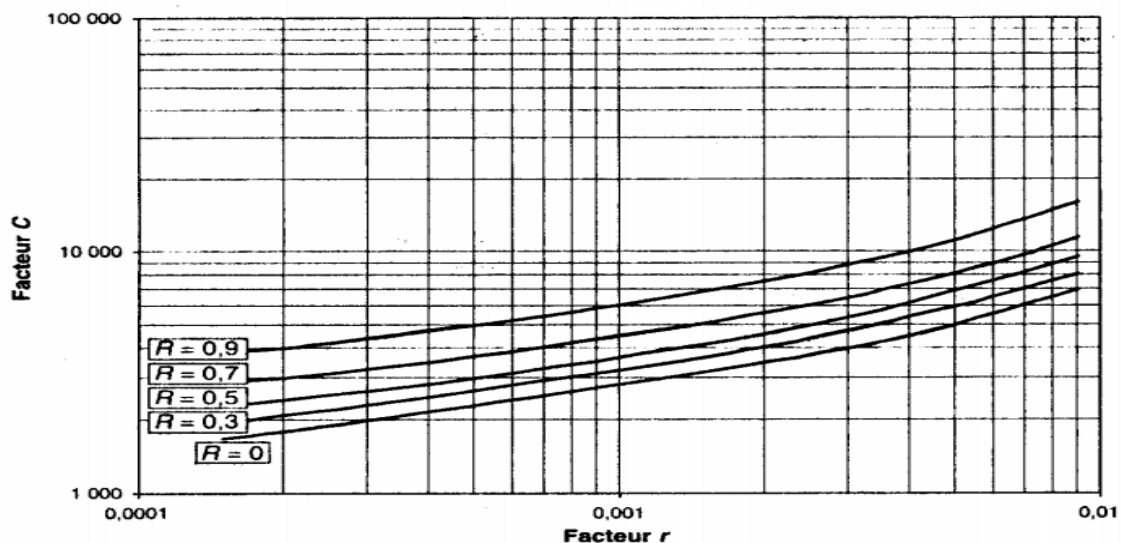
$$\text{Avec : } S = Q * \frac{10^{-3}}{T_1 - t_1} \quad (\text{II.19})$$

Q la chaleur échangée en Kcal/h.

C : coefficient de coût ; donné en fonction de r et R. par la figure suivante.

$$R = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - t_1} \quad (\text{II.20})$$

Et ; r, la résistance au transfert.



**Figure II.17 :** Le coefficient de coût ; méthode de pré-estime [24]

$$P_r = P_b * f_e * f_p * f_l * f_N * f_m ; \quad (II.21)$$

Le prix réel est le produit de prix de base par les facteurs de correction d'épaisseur, de pression, de longueur de tube, de nombre de rangées et de matériau respectivement.

Le prix de base étant établi dans 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.

Seuls les facteurs correctifs de longueur et de rangées sont alors considérés.

L'inflation annuelle est calculée grâce à un logiciel en ligne [68].

**Tableau II.16** : Estimation du coût de l'aérocondenseur.

	Prix de Base Euro (2000)	Prix Euro (2000)	Prix Euro (2012)	Prix DZD (2012)
1er Mobilab	882	1 268	1 572	157 200
2e Mobilab	1 765	2 537	3 145	314 500
3e Mobilab	3 530	5 074	6 290	629 000

## I.2 Estimation du coût du système photovoltaïque :

Le coût est calculé basant sur le prix de revient par watt crête. Pour un prix de revient de 4 Euro/ Watt Crête [69], le coût de l'installation sera comme suit :

**Tableau II.17** : Estimation du coût du système photovoltaïque.

	1er Mobilab	2e Mobilab	3e Mobilab
Nombre des panneaux	15	22	33
Prix de revient (€)	12 000 €	17 600 €	26 400 €
Prix de revient (DZD)	1 200 000 DZD	1 760 000 DZD	2 640 000 DZD

### I.3 Estimation du coût du matériel restant :

#### a. Estimation du coût du Mobilab :

Le Mobilab est un camion caisse qui regroupe une remorque et un container. Au prix d'achat de ce camion, est ajouté le prix de sa pause. Pour un container de 30 pieds (Mobilab moyen), le coût est estimé à 7200000 DZD sur le marché algérien.

Nous déterminons donc le prix des autres Mobilab par méthode exponentielle (extrapolation à base de rapport des capacités).

**Tableau II.18 :** Estimation du coût du container.

	1er Mobilab	2e Mobilab	3e Mobilab
Container [pieds]	20	30	45
Coût DZD	5 645 179	7 200 000	9 183 056

#### b. Estimation du coût du décanteur :

Le décanteur est un vase florentin avec ses accessoires. Pour une capacité de 20L (Mobilab moyen), le coût est estimé à 48560 DZD.

Nous déterminons donc le prix des décanteurs pour les autres Mobilab par méthode exponentielle (extrapolation à base de rapport des capacités).

**Tableau II.19 :** Estimation du coût du décanteur

	1er Mobilab	2e Mobilab	3e Mobilab
Volume [L]	10	20	40
Coût DZD	32 037	48 560	73 603

#### c. Estimation du coût de la cheminée :

Le prix de la cheminée est estimé à 79000 DZD.

#### d. Estimation du coût des caissons mobiles :

Les caissons mobiles sont des parallélépipèdes constitués de plaques en acier inoxydable, munis de roues, et d'un panier, d'un robinet de vidange, et reliés entre eux par des tubes en PEHD. Le prix d'un caisson est estimé à 11 000 DZD.

**Tableau II.20 :** Estimation du coût des caissons.

	1er Mobilab	2e Mobilab	3e Mobilab
Nombre de caissons	4	6	10
Coût DZD	44 000	66 000	110 000

#### e. Estimation du coût de la tuyauterie et de l'instrumentation :

Les tuyaux sont des tubes inox, leur prix sera alors égal à :

Prix tuyauterie = (Prix tubes inox (30/32) / m × longueur) ; le prix unitaire est égal à 116 DZD.

Le prix de l'instrumentation comprend celui de la soupape de sécurité ; des indicateurs de niveau du ballon ; Des vannes ; des débitmètres ; et du capteur de pression. C'est le même pour les trois Mobilab.

**Tableau II.21** : Estimation du coût de la tuyauterie et l'instrumentation.

	1er Mobilab	2e Mobilab	3e Mobilab
<b>Tuyauterie</b>	6 264	10 254	20 512
<b>Instrumentation</b>	227 500	227 500	227 500
Vannes (5)	60 000	60 000	60 000
Débitmètres (5)	150 000	150 000	150 000
Capteur	12 000	12 000	12 000
Soupape	2 500	2 500	2 500
Indicateur de niveau	3 000	3 000	3 000
<b>Main d'œuvre (10%)</b>	23 376	23 775	24 801
<b>Total (DZD)</b>	257 140	261 530	272 814

**f. Le coût total de l'unité :**

Le tableau II.22 regroupe les résultats précédant.

**Tableau II.22** : Estimation du coût total de l'unité d'extraction mobile :

	1 <sup>er</sup> Mobilab	2e Mobilab	3e Mobilab
<b>Véhicule</b>			
Camion Container	5 645 179	7 200 000	9 183 056
<b>Unité d'extraction</b>			
Caissons mobiles	44 000	66 000	110 000
Décanteur	32 037	48 560	73 603
Aérocondenseur	157 200	314 500	629 000
Cheminée	79 000	79 000	79 000
Tuyauterie/ Instrumentation	257 140	261 530	272 814
Total	569 377	769 590	1 164 417
<b>Installation Solaire</b>			
Système photovoltaïque	1 200 000	1 760 000	2 640 000
<b>Total</b>	<b>7 414 556</b>	<b>9 729 590</b>	<b>12 987 473</b>

**II. CALCUL DU COUT OPERATOIRE :**

Notre unité mobile auto énergétique est exonérée de beaucoup de frais, par exemple, la location du siège, les utilités, les taxes envers l'environnement (si existantes)...etc.

Pour cela, notre unité est mise en marche en continu pendant 8 mois de l'année, soit du mois de mars au mois d'octobre.

## II. 1 Les charges variables :

C'est le coût des matières premières et des utilités.

### a. Utilités :

Cette partie regroupe le coût d'électricité, de combustible, de vapeur, d'eau de refroidissement, eau de vapeur, et de condensats.

La production de vapeur est obtenue par combustion de biomasse. Cette biomasse est le résidu des plantes végétales dont on extrait l'arôme. Cela veut dire que la biomasse est gratuite. On calcule uniquement le prix de la matière première.

Pour l'aérocondenseur, l'apport est assuré par les panneaux photovoltaïques, le prix de l'électricité restant à fournir est tiré du tableau II.15. Ces valeurs restent toujours négligeables.

**Tableau II.23** : coût d'utilités.

	1er Mobilab	2e Mobilab	3e Mobilab
Utilités	2 211	5 710	14 744

### b. Matières premières :

Les matières premières utilisées dans notre unité sont l'eau (qui est de coût négligeable car le circuit est fermé) et la matière végétale séchée dont le prix n'excède pas 30DA/Kg.

**Tableau II.24** : Estimation du coût de la matière première

	1 <sup>er</sup> Mobilab	2e Mobilab	3e Mobilab
Consommation Kg/jour	400	800	1600
Consommation Kg/an	96 000	192 000	384 000
Coût DZD	2 880 000	5 760 000	11 520 000

### c. Les frais de la main d'œuvre :

**Tableau II.25** : Estimation des frais de la main d'œuvre.

Catégorie	Nombre	Salaires (DZD/mois)
Technicien supérieur	1	35 000
Ouvrier	1	20 000
Gardien	1	15 000
Total 8 mois de travail		560 000

## II. 2 Les charges fixes :

### a. L'entretien et l'inspection routinière :

Représente 4% de montant de l'investissement en matériel «  $I_m$  ».

### b. Droit et assurances (Insurance & duties) :

Variante d'un pays à un autre, nous les prenons égaux à 2% de montant de l'investissement en matériel «  $I_m$  ».

### c. Les frais financiers :

Dus au crédit qui représente 70% des investissements. Le crédit est de taux 8 % remboursable dans un délai de 5 ans.

La fonction VPM de Excel calcule les dépenses annuelles dus au crédit.

**Tableau II.26 :** Estimation des frais financiers.

	1er Mobilab	2e Mobilab	3e Mobilab
Investissement	7 414 556	9 729 590	12 987 473
Crédit (70%)	5 190 189	6 810 713	9 091 231
Frais financier (DA/ An)	1 857 024	2 436 839	3 252 796

### d. Calcul de l'amortissement :

En comptabilité générale ; l'amortissement est la diminution de valeur des immobilisations dues au vieillissement physique, technique qui font que la durée de vie du matériel est limitée et peut être définie réglementairement. Selon le mode de calcul ; l'amortissement peut être linéaire ou dégressif.

Pour calculer l'amortissement linéaire, on détermine d'abord la durée de l'utilisation qui va différer d'un matériel à un autre.

Le taux d'amortissement sera égal à  $100 / \text{durée d'amortissement (en années)}$ .

**Tableau II.27 :** L'amortissement.

Amortissement	durée [années]	Taux %
Véhicule lourd	8	12.5
Kit photovoltaïque	25	4
Matériel d'extraction	10	10

L'amortissement est donné en DA, dans le tableau suivant.

**Tableau II.28 : Calcul de l'amortissement.**

Installation	1 <sup>er</sup> Mobilab	2e Mobilab	3e Mobilab
Véhicule	705 647	900 000	1 147 882
Kit photovoltaïque	48 000	70 400	105 600
Matériel d'extraction	56 938	76 959	116 442
Total	810 585	1 047 359	1 369 924
Années d'amortissement	9,1	9,3	9,5

**e. Frais de la distribution.**

Représente 2% de montant de l'investissement en matériel « Im ».

**II. 3 Le coût opératoire :**

Finalement, le coût opératoire est donné dans le tableau II.29.

**Tableau II.29 : Le coût opératoire**

	1er Mobilab	2e Mobilab	3e Mobilab
<b>Investissement en matériel (Im)</b>	7 414 556	9 729 590	12 987 473
<b>Charges Fixes</b>			
Entretien/ inspection routinière (4%)	296 582	389 184	519 499
Taxes & Assurances (2%)	148 291	194 592	259 749
Frais financiers	1 857 024	2 436 839	3 252 796
Amortissement	810 585	1 047 359	1 369 924
<b>Total</b>	<b>3 112 482</b>	<b>4 067 973</b>	<b>5 401 968</b>
<b>Charges Variables</b>			
Matière 1er	2 880 000	5 760 000	11 520 000
Main d'œuvre	560 000	560 000	560 000
Utilités	2 211	5 710	14 744
<b>Total</b>	<b>3 442 211</b>	<b>6 325 710</b>	<b>12 094 744</b>
<b>Coût Opératoire</b>	<b>6 554 693</b>	<b>10 393 683</b>	<b>17 496 712</b>

**III. LES COMPTES D'EXPLOITATION PREVISIONNELLE :**

Nous cherchons à établir le plan de production de notre unité pour déterminer les flux de trésorerie générés pendant la durée de vie de notre investissement.

L'unité fonctionnera à 100 % de sa capacité dès sa première année ; pendant 8 mois durant l'année.



Pour avoir la quantité des HE produite, il est nécessaire de connaître le rendement. Ce dernier varie avec beaucoup de paramètres. En termes de masse, il varie entre 1 et 4%, nous considérons un rendement moyen de 2%.

Le prix unitaire est pris égal à 20000 DZD/Kg, pour l'HE. Avec un taux d'inflation annuel de 5%.

**Tableau II.30** : La production annuelle des huiles essentielles.

	1er Mobilab	2e Mobilab	3e Mobilab
Capacité (Kg/h)	50	100	200
Masse végétale traitée Kg/année	96 000	192 000	384 000
Masse d'HE produite HE : Kg/an Rendement 2%	1920	3840	7680

La fiche en annexe 03 donnera les résultats pour le Mobilab moyen.

#### IV. LE DELAI DE RETOUR SUR INVESTISSEMENT :

Le délai de retour sur investissement DRI est la période au bout de laquelle on commence à avoir des bénéfices, c'est-à-dire, l'investissement initial est remboursé. Le DRI est égal au rapport entre l'investissement et le gain annuel. Pour le Mobilab 2, DRI = 2 mois.

#### V. COMPARAISON DES 3 MOBILAB :

Bien que le choix du Mobilab dépend principalement de la quantité à produire, nous allons toutefois comparer les résultats obtenues afin de voir le moins coûteux et le plus rentable.

**Tableau II.31** : Comparaison des trois Mobilab

	Mobilab 1	Mobilab 2	Mobilab 3
Coût opératoire	6 554 693	10 393 683	17 496 712
VAN de la 1ère année	31 699 227	66 211 725	135 858 282
DRI (années)	0,21	0,16	0,13
DRI (Mois)	2 mois et demi	2 mois	1 mois et demi
Production : KG/an	1 920	3 840	7 680
Coût opératoire (DZD/ kg)	3 414	2 707	2 278
VAN (DZD/ Kg)	16 510	17 243	17 690

Nous remarquons que le Mobilab 3 enregistre le coût opératoire unitaire, et le DRI le plus bas, et au même temps la VAN unitaire la plus haute. Ce qui nous laisse penser

qu'investir dans un Mobilab de cette taille vaut mieux qu'investir dans deux Mobilab moyens. Cependant, il ne faut pas oublier que les panneaux photovoltaïques n'assurent pas l'autosuffisance pour ce dernier.

## CONCLUSION

Notre travail consiste à l'examen de la substitution du condenseur à eau classiquement utilisé dans les unités d'extraction d'huiles essentielles par aérocondenseur. Cette option permettra d'assurer la mobilité de l'unité.

En premier lieu ; nous avons utilisé le logiciel de simulation Hysys pour dimensionner l'aérocondenseur. A l'aide d'un bilan de matière et d'énergie, le Hysys nous fournit le débit d'air nécessaire pour la condensation et le produit de coefficient d'échange thermique par la surface faciale.

Cependant, pour dimensionner notre aérocondenseur, nous avons besoin des caractéristiques du système de ventilation, et des dimensions du tube serpentin ; valeurs qui ne sont pas fournis par le Hysys. Lors d'une étude analytique, un système d'équations est alors établi, et un programme de calcul Excel est développé pour les résoudre.

La base de données établie grâce à ces résultats satisfait nos besoins, et nous permet de choisir l'aérocondenseur adéquat pour notre unité d'extraction.

Dans une autre partie, nous avons essayé de modéliser mathématiquement les résultats de Hysys ; et d'écrire le débit d'air nécessaire pour la condensation et le produit de coefficient d'échange thermique par la surface faciale en fonction d'autres paramètres. Le modèle linéaire n'a pu être appliqué, nous sommes donc passés à un modèle de 2<sup>nd</sup> degrés au moyen du logiciel Sigma Plot. Les résultats paraissent acceptables notamment pour le débit d'air nécessaire.

Par ailleurs, nous avons utilisé le logiciel PV-GIS pour dimensionner le système photovoltaïque et déterminer la surface des panneaux nécessaires pour couvrir les besoins journaliers en énergie du condenseur. Les panneaux sont disposés sur le toit du Mobilab avec une surface limitée, cependant l'autonomie énergétique a pu être assurée durant une longue période de l'année pour l'unité mobile de petite et de moyenne taille.

A la lumière des résultats de dimensionnement, une étude économique dans le but de déterminer le coût d'investissement et son délai de récupération a été menée.

Une unité de production moyenne avec une capacité de 3840 kg d'huile essentielles produites par an pourra avoir une valeur nette ajoutée près de 66 millions de dinars (1ère année d'exploitation) et un délai de retour sur investissement de 2 mois.

Enfin, il serait utile d'élargir la base des données établies intégrant d'autres villes et de proposer un modèle de consommation d'énergie de l'unité combinant le solaire et la biomasse ; choses qui peuvent faire l'objet de travaux futurs.

## BIBLIOGRAPHIE

1. F. KREITH & Coll. The CRC Handbook of Thermal Engineering. Edition CRC Press 2000.
2. D. KERN. "Process and Heat Transfert". Edition Mc Graw Hill, Tokyo, Japan, 1983.
3. Y. JANNOT. Cours de Transfert thermique. Ecole des Mines Nancy ; 2009.
4. P. PANDAY. Transfert en changement de phase ; condensation sur des surface lisses. Techniques de l'ingénieur, Dossier n° be8238.
5. A. BONTEMPS. Condensation de mélanges de vapeurs ; transfert de chaleur et de masse. Techniques de l'ingénieur, Dossier n° be9910.
6. INCORPERA; « Fundamentals of Heat and Mass transfer ». 6éme edition, Wiley.
7. TEMA. "Heat Exchanger Design Handbook: 1st book "Heat Exchanger Theory". Edité par "The International Centre for Heat and Mass Transfer", Hemisphere Publishing Corporation, 1986.
8. A. BONTEMPS, A.CARRIGUE, C.GOUBIER, J.HUETZ, C. MARVILLET, P. MERCIER et R. VIDIL. Echangeurs de chaleur, description des échangeurs. Techniques de l'ingénieur, Dossier n° B2341. 1995.
9. A. BONTEMPS, A.CARRIGUE, C.GOUBIER, J.HUETZ, C. MARVILLET, P. MERCIER et R. VIDIL. Echangeurs de chaleur, dimensionnement thermique. Techniques de l'ingénieur, Dossier n° B2342. 1994.
10. R. W. SERTH. Process Heat Transfer. Elsevier, 2007.
11. PERRY's Chemical Hand Book. Section 11; Heat Transfer equipment. 7éme edition; Mc Graw Hill, 1997.
12. TEMA. "Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association". 9éme edition, 2007.
13. T. KUPPAN. "Heat Exchanger Design Handboook".
14. COULSON & RICHARDSON. "Chemical Engineering Design; Vol 6". 4<sup>th</sup> edition, Elsevier 2005.
15. A. BONTEMPS, A.CARRIGUE, C.GOUBIER, J.HUETZ, C. MARVILLET, P. MERCIER et R. VIDIL. Echangeurs de chaleur, intensification des échanges thermiques. Techniques de l'ingénieur, Dossier n° B2343. 1994.
16. M.A. MASRI. "Aéroréfrigérants: Sélection, Design & Exploitation", cours de l'IAP Boumerdes, Algérie, Mai 2008.
17. R. FEIDT. Aéroréfrigérants directs secs. Techniques de l'ingénieur, Dossier n° be8940, 2010.
18. R. FEIDT. Aérocondenseurs. Techniques de l'ingénieur, Dossier n° be8941, 2010.
19. F.R. AMRANI. et A. BASTA. Potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans une unité d'extraction d'huiles essentielles. Projet de fin d'études, E.N.P, Alger, Algérie ; 2008.
20. A. NAIT SIDI AHMED. et L. ALLOUACHE. Potentiel d'intégration des énergies renouvelables dans une unité d'extraction d'huiles essentielles mobile. Projet de fin d'études, E.N.P, Alger, Algérie ; 2009.

21. TEMA. "Heat Exchanger Design Handbook: 3rd book "Thermal and Hydraulic Design of Heat Exchanger". Edité par "The International Centre for Heat and Mass Transfer", Hemisphere Publishing Corporation, 1986.
22. TEMA. "Heat Exchanger Design Handbook: 4th book "Mechanical Design of Heat Exchanger". Edité par "The International Centre for Heat and Mass Transfer", Hemisphere Publishing Corporation, 1986.
23. GPSA: Gas Processors Suppliers Association. "Engineering Data Book" Section10, "Air cooled Exchanger". 12<sup>ème</sup> edition, Oklahoma, 2004.
24. A. CHAUVEL, G. FOURNIER et C. RAIMBAULT. Manuel d'évaluation économique des procédés. Editions Technip, Paris, France, 2001.
25. Entreprise TOTAL. Séminaire "Gas Processing Plant Design And Operation", Avril 1992.
26. E. KRELL. "Techniques and Instrumentation in Analytical Chemistry, Volume2 :Handbook of laboratory distillation". Elsevier; 1982.
27. [www.nature-helps.org](http://www.nature-helps.org)
28. J-M. LARDRY & V. HABERKORN. Revue de la kinésithérapie, volume 7, issue 61 "l'aromathérapie et les huiles essentielles", pages 14-17. Janvier 2007.
29. S. COLNORT-BODET. Revue d'histoire de la pharmacie, volume 55, numéro 192, page 421-423 ; 1967.
30. J. GARNERO. Huiles essentielles. Techniques de l'ingénieur, Dossier n° K 345. 1996.
31. ACTUALITES PHARMACEUTIQUES n°492, la réglementation régissant les huiles essentielles, pages 54-56. Janvier 2010.
32. E. GUENTHER. "The Essential Oils" Vol I. D Van Nostrand Company, 1948.
33. F.X. GARNEAU. Le Matériel Végétal Et Les Huiles Essentielles. Université de Quebec à Chicoutimi UQAC.
34. EH. BENYOUSSEF. Développement des procédés d'extraction des essences de coriandre et de nigelle. Etude de leurs processus et applications. Thèse de Doctorat d'état en génie chimique. ENP Alger, Juin 1999.
35. E. HERNANDEZ. Encyclopedia of Separation Science, Pages 2739-2744. 2000.
36. B. BENJILALI. Extraction Des Plantes Aromatiques et Médicinales : Cas particulier de l'entraînement a la vapeur d'eau et ses équipements. Université Hassan II, Rabat, Maroc.
37. J-M. LARDRY & V. HABERKORN. Revue de la kinésithérapie, volume 7, issue 61 " Les huiles essentielles : Principe d'utilisation », pages 18-23. Janvier 2007.
38. B. BENJILALI. Le Matériel Végétal Et L'extraction. Université Hassan II, Rabat, Maroc
39. M. PERRUT. Extraction par fluide supercritique. Techniques de l'ingénieur, Dossier n° J2770. 1999.
40. J-Y ANIZON, B. LEMAIRE & M. SURBLED. Extraction assistée par micro ondes. Techniques de l'ingénieur, Dossier n° F3060. 2003.
41. République Libanaise. « Stratégie Et Politique Agricole De Floriculture. » Direction des Etudes et de La Coordination, Ministère de l'Agriculture, République Libanaise.

42. J. GRYSOLE. La Commercialisation Des Huiles Essentielles.
43. J. KABERA NZEYUMWAMI. Caractérisation des huiles essentielles de trois plantes aromatiques: Hyptis Spicigera, Pluchea Ovalis et Laggera Aurita. DEA, Université de Lome- Togo ; 2004.
44. N. ZOUAGHI. Contribution à l'étude du procédé d'extraction de l'huile essentielle des graines de Coriandre. Application des résultats à l'échelle industrielle. Thèse de Magister, E.N.P, Alger, Algérie, 2001.
45. <http://www.energie-photovoltaïque-et-solaire.com/>; consulté le 25 Avril 2012.
- 46 M.R. PATEL. Wind and Solar Power Systems. CRC Press, 1999.
- 47 B. Duchêne. Données Alimentation Photovoltaïque. Article de « Electriciens sans frontières », Mis à jour le 06 janvier 2012.
- 48 <http://www.panneauxsolaires.eu/>; consulté le 12 Mai 2012.
- 49 <http://www.panneauxphotovoltaïques.eu/>; consulté le 08 Mai 2012.
- 50 J-C. MULLER. Électricité photovoltaïque – Principes. Technique de l'Ingénieur, dossier n° BE8578 ; 2007.
- 51 M.J TCHANA NKOUMI. Outil d'aide au dimensionnement des systèmes photovoltaïques domestiques. Mémoire d'ingénieur en génie électrique ; Ecole nationale supérieure polytechnique de Yaoundé 2009.
- 52 CLEFS CEA - N° 50/51 - revue de Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). Le stockage de l'électricité d'origine photovoltaïque. HIVER 2004-2005.
- 53 J-C. MULLER. Électricité photovoltaïque – Filières et marché. Technique de l'Ingénieur, dossier n° BE8579 ; 2007.
- 54 <http://www.mem-algeria.org/> ministère de l'énergie est des mines, consulté le 12 Mai 2012.
- 55 A. KHELIF. Expérience, Potentiel Et Marche Photovoltaïque Algérien. New Energy Algeria NEAL.
56. PERRY's Chemical Hand Book. Section 9; Process Economics. 7ème edition; Mc Graw Hill, 1997.
57. C. AZZARO-PANTEL. Cours de « Calcul des Investissements » ; Ecole Nationale Supérieure Des Ingénieurs En Arts Chimiques Et Technologiques Toulouse, 2012.
58. H. SILLA. Chemical Process Engineering: Design & Economics. Taylor & Francis Group LLC, 2003.
59. B. LAKHLEF. Création et Gestion d'entreprise, les erreurs à éviter », Alger-livres éditions, 2ème édition, 2009.
60. N. REBAI, in « Initiation au simulateur HYSYS », cours IAP, Boumerdès, Algérie, 2008.
61. ASPEN Technology. Hysys 3.2, User Guide. Hyprotech, Aspen Technology 2003.
62. J. GOUPEY & L. CREIGHTON. Introduction aux plans d'expériences. 3ème édition, Dunod 2006.
63. R. PERRIN & J.P. SCHARFF. Chimie Industrielle. Edition Masson, 1995.
64. J. GOUPEY. Plans d'expériences. Technique de l'Ingénieur PE230, 1997.
65. SIGMA Plus. Sigma Plus 10.0 User Manuel. 2006.

66. PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), logiciel en ligne <http://sunbird.jrc.it/pvgis/apps/pvest.php> ; développé par centre européen de recherche (Joint Research Center) ; sis en Italie. Consulté en Mars, Avril 2012.
67. <http://www.meteo.dz/> ; consulté le 20 Novembre 2011.
68. Calculateur d'inflation en ligne : [http://france-inflation.com/calculateur\\_inflation.php](http://france-inflation.com/calculateur_inflation.php) ; consulté le 01 mai 2012.
69. <http://panneauxphotovoltaiques.durable.com/a-rentabilite-photovoltaique>; consulté le 10 Septembre 2012.

**ANNEXE 01 :**  
**DIMENSIONS DES MOBILAB CONSIDERES**

Tableau A : Capacité de chaque Mobilab

	Petit Mobilab	Moyen Mobilab	Grand Mobilab
Débit de Vapeur [L/jr]	400	800	1600
Matière Végétale traitée [Kg/jr]	400	800	1600


<b>Container 20' pieds</b>		
	<b>Dimensions Intérieures</b>	Longueur 6.00 m
		Largeur 2.30 m
		Hauteur 2.40 m
	<b>Ouverture de Portes</b>	Largeur 2.286 m
		Hauteur 2.278 m
	<b>Poids du Tare</b>	1 900 kg
<b>Capacité en Volume</b>	33.12 m3	
<b>Capacité de Chargement</b>	22 100 kg	

Figure A : 1<sup>er</sup> Mobilab.


<b>Container 30' pieds</b>		
	<b>Dimensions Intérieures</b>	Longueur 9.00 m
		Largeur 2.30 m
		Hauteur 2.40 m
	<b>Ouverture de Portes</b>	Largeur 2.286 m
		Hauteur 2.278 m
	<b>Poids du Tare</b>	2492 kg
<b>Capacité en Volume</b>	49.68 m3	
<b>Capacité de Chargement</b>	24 749 kg	

Figure B : 2<sup>ème</sup> Mobilab.




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

Figure C : 3<sup>ème</sup> Mobilab.

## ANNEXE 02 :

### Programme de Calcul EXCEL

#### ❖ Les colonnes I : caractéristique de ventilateurs

- La colonne I.1 :

Numéro de ventilateur.

- La colonne I.2 :

Le débit de ventilateur.

- La colonne I.3 :

Le diamètre de ventilateur [m]

- La colonne I.4 :

La vitesse faciale de ventilateur [m/s] ; Donnée par la formule :

$$v = (\text{débit volumique horaire} * 4) / (3600 * \pi * \text{diamètre}^2)$$

- La colonne I.5 :

Le coefficient ra ; coefficient du film extérieur (air) ; Calculé par la corrélation (II.1):  $ra = 0,0020725 - (0,00034793 * v)$

- La colonne I.6 :

$$1/U = r_i + r_m + r_a + r_d = ra + 0.0045$$

- La colonne I.7 :

Le coefficient d'échange global ; U [kcal/h.m<sup>2</sup>.°C]

- La colonne I.8 :

Le coefficient d'échange global ; U [KJ/h.m<sup>2</sup>.°C]

#### ❖ Les colonnes II : les résultats donnés par le hysys ; Débit de vapeur=1kg/h.

- La colonne II.1 :

La température de sortie de l'air t<sub>2</sub> ; varie entre 30 et 50°C.

- La colonne II.2 :

Le débit volumique de l'air D2, valeur donnée par le hysys.

- La colonne II.3 :

La puissance absorbée par le ventilateur en Cheval vapeur calculée par l'équation (II.17)

$$P = \frac{Q}{1061 V_f (t_2 - t_1)}$$

- La colonne II.4 :

Le pourcentage de puissance gagnée en passant de température de sortie  $t_2=30^\circ\text{C}$  à la température considérée.

$$G (\%) = \frac{P_{t_2} - P_{t_2=30^\circ\text{C}}}{P_{t_2}}$$

- La colonne II.5 :

Le produit UA, donné par le Hysys, produit de coefficient d'échange global par la surface d'échange nécessaire.

- La colonne II.6 :

La surface d'échange A ; calculée par le rapport :

$$A = UA/U [\text{m}^2]$$

❖ Les colonnes III : le 1<sup>er</sup> MOBILAB ; Débit de vapeur=50kg/h.

- La colonne III.1 :

Identique à II.1.

- La colonne III.2 :

Le débit volumique de l'air D2 ; c'est le produit du débit volumique donné par le hysys pour un débit de 1kg/h par 50.

$$D2 (\text{débit de vapeur } 50 \text{ kg/h}) = D2(\text{débit de vapeur } 1 \text{ kg/h}) * 50$$

- La colonne III.3 :

Identique à II.4.

- La colonne III.4 :

Le produit UA pour un débit de vapeur de 50kg/h ; donné par :

$$UA (\text{débit de vapeur } 50 \text{ kg/h}) = UA(\text{débit de vapeur } 1 \text{ kg/h}) * 50$$

- La colonne III.5 :

La surface d'échange A ;

- La colonne III.6 :

Le nombre de ventilateurs nécessaires ; N ; égal au rapport de débit total nécessaire par le débit de ventilateur, N est un nombre entier :

$$N = \text{ENT} (D2/\text{débit de ventilateur}) + 1$$

Avec « ENT » la fonction de EXCEL 2007 qui arrondit un nombre à l'entier immédiatement inférieur.

- La colonne III.7 :

Le nombre de ventilateurs disposés sur chaque rangée ; égal à :

$$N' = \text{pair}(N)/2$$

Dans le cas de la première disposition.

Avec « PAIR » la fonction de EXCEL 2007 qui arrondit un nombre au nombre pair le plus proche en s'éloignant de zéro.

Et égal à :

$$\text{SI}(\text{MOD}(\text{BD14};3)=0;\text{BD14}/3;\text{ENT}(\text{BD14}/3)+1)$$

Dans le cas de la deuxième disposition.

Une équation qui vérifie si le nombre de ventilateurs est multiple de trois ou pas. Puis elle renvoie le nombre de ventilateurs nécessaire sur chaque rangée.

- La colonne III.8 :

La longueur de tube ; L ; donnée par :

$$L = A/\pi * 0.0032 [m]$$

- La colonne III.9 :

La largeur du rectangle où seront disposés les ventilateurs et le serpentin ;

$$Z_1 = (\text{diamètre de ventilateur} * 2) + 0.2$$

- La colonne III.10 :

La longueur du rectangle où seront disposés les ventilateurs et le serpentin ; pour le Mobilab N°1, elle doit être inférieure à 6 :

$$Z2=\text{SI}((\text{diamètre}+0,1)*N'<6; (\text{diamètre}+0,1)*N'<6;"Z2>6")$$

Avec « SI » la fonction Condition de EXCEL 2007 qui va donner la valeur numérique de Z2 si elle est inférieure à 6. Dans le cas contraire ; elle affichera « Z2>6 ».

- La colonne III.11 :

La solution mathématique de l'équation (II.6) ;  $\alpha$  ( $\alpha$  ici est  $n$ ) :

$$n^2 \left[ 0.032 \left( 1 - \left( \frac{\pi}{2} \right) \right) + Z_1 \right] + \left[ Z_2 \left( \left( \frac{\pi}{2} \right) - 1 \right) + 0.032 + Z_1 - L \right] n + (0.032 - Z_2) = 0$$

Equation de 2nd degrés ;

La solution est donnée par :

=SI (ESTTEXTE (colonne III.10); "" ; solution)

Avec « ESTTEXTE » la fonction Condition de EXCEL 2007 qui vérifie si la case concernée par le test, soit Z2 est une valeur numérique

Et « SI » la fonction Condition de EXCEL 2007 qui va donner la valeur numérique de la solution de l'équation, si la valeur numérique de Z2 est donnée. Dans le cas contraire ; rien ne sera affiché.

➤ La colonne III.12 :

Fonction qui va tester la condition  $Z1 > d > 0.1$  ;

=SI (ESTTEXTE ( $\alpha$ ); "" ; SI (d < Z1 ; SI (d > 0.1 ; "vérifiée" ; "non vérifiée") ; "non vérifiée"))

Avec « ESTTEXTE » la fonction Condition de EXCEL 2007 qui vérifie si la case concernée par le test, soit la solution mathématique est une valeur numérique

Et « SI » les fonctions Condition de EXCEL 2007 qui vont vérifier que  $Z1 > d > 0.1$  et afficher « vérifiée » ou « non vérifiée ».

➤ La colonne III.13 :

Le nombre de courbures ; n ; qui est la solution « physique » de l'équation, n doit être un nombre entier :

N =SI (ESTTEXTE ( $\alpha$ ); " " ; SI (d < Z1 ; SI (d > 0.1 ; ENT ( $\alpha$ ) +1 ; " ") ; " ")

Avec « ESTTEXTE » la fonction Condition de EXCEL 2007 qui vérifie si la case concernée par le test, soit la solution mathématique est une valeur numérique

Et « SI » les fonctions Condition de EXCEL 2007 qui vont vérifier que la solution mathématique existe et que  $Z1 > d > 0.1$  et donner n ; avec  $n = ENT (\alpha) + 1$  ; « ENT » la fonction de EXCEL 2007 qui arrondit un nombre à l'entier immédiatement inférieur.

Si une des conditions est non vérifiée, rien ne sera affiché.

➤ La colonne III.14 :

Le diamètre de courbure de tube ; d ;

$d = SI (ESTTEXTE (\alpha); " " ; SI (d < Z1 ; SI (d > 0.1 ; (Z2 - (\alpha + 1) * D_{\text{tuyau}}) / \alpha ; " ") ; " ")$

Avec « ESTTEXTE » la fonction Condition de EXCEL 2007 qui vérifie si la case concernée par le test, soit la solution mathématique est une valeur numérique

Et « SI » les fonctions Condition de EXCEL 2007 qui vont vérifier que la solution mathématique existe et que  $Z1 > d > 0.1$  et donner d ; avec

$$d = (Z2 - (\alpha + 1) * D_{\text{tuyau}}) / \alpha = (Z2 - (\alpha + 1) * 0.032) / \alpha$$

Si une des conditions est non vérifiée, rien ne sera affiché.

- La colonne III.15 :

La longueur l (figure II.8) ; donnée par

$$l = Z_1 - d$$

Affichée si les conditions citées précédemment sont vérifiées.

- La colonne III.16 :

Le pourcentage de la surface couverte par les ventilateurs ; égale à :

$$N * \frac{\text{surface d'un ventilateur}}{A}$$

Avec

$$\text{surface d'un ventilateur} = \pi * \frac{\text{diamètre}^2}{4}$$

Donnée en pourcentage, et affichée si les conditions citées précédemment sont vérifiées.

- ❖ Les colonnes IV : le 2ème MOBILAB ; Débit de vapeur=100kg/h.

Calculs identiques aux précédents sauf que :

Le débit de vapeur =100 kg/h.

La condition à vérifier est  $Z2 < 9$ .

- ❖ Les colonnes V : le 3ème MOBILAB ; Débit de vapeur=200kg/h.

Calculs identiques aux précédents sauf que :

Le débit de vapeur =200 kg/h.

La condition à vérifier est  $Z2 < 13.7$ .

Un exemple d'application est donné dans ce qui suit.

configuration (one tube row, one pass)					
composition: eau pure 100 % vapeur à l'entrée					
condensation totale : eau 100 % liquide à la sortie					
P entrée :100 Kpa					
P sortie : 99 Kpa					
Données:	Fixés:	T1 105°C	T2 30° C	t1 25°C	Débit de vapeur 1 Kg/h
	A faire varier:	t2: sortie de l'air			

configuration (one tube row, one pass)					
composition: eau pure 100 % vapeur à l'entrée					
condensation totale : eau 100 % liquide à la sortie					
P entrée :100 Kpa					
P sortie : 99 Kpa					
Données:	Fixés:	T1 105°C	T2 30° C	t1 25°C	Débit de vapeur 50 Kg/h
	A faire varier:	t2: sortie de l'air			

I								II						III															
I.1	I.2	I.3	I.4	I.5	I.6	I.7	I.8	II.1	II.2	II.3	II.4	II.5	II.6	III.1	III.2	III.3	III.4	III.5	III.6	III.7	III.8	III.9	III.10	III.11	III.12	III.13	III.14	III.15	III.16
N de ventilateur	Débit par ventilateur	Diamètre [m]	vitesse faciale m/s	ra	1/U	U [kcal/h.m <sup>2</sup> .°C]	U [KJ/h.m <sup>2</sup> .°C]	T sortie air °C	D2 (m3/h)	puissance ventilateur (CV)	G: %	UA KJ/ C-h	A (m2)	T sortie air °C	D2 (m3/h)	puissance ventilateur (CV)	UA KJ/ C-h	A (m2)	N	N'	L	Z1	Z2	α	condition Z1>d>0,1	n	d	l	Surface couverte %
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	50	89,34	0,34	80,00%	239,23	0,08	50	4 467,18	16,77	11 961,53	3,79	1	1	37,67	2,34	0,78	15,03	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	49	92,92	0,35	79,17%	222,41	0,07	49	4 645,93	17,47	11 120,46	3,52	2	1	35,02	2,34	0,78	13,89	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	48	96,80	0,36	78,26%	207,98	0,07	48	4 840,23	18,22	10 399,10	3,29	2	1	32,75	2,34	0,78	12,92	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	47	101,04	0,38	77,27%	195,48	0,06	47	5 052,18	19,05	9 774,17	3,09	2	1	30,78	2,34	0,78	12,07	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	46	105,69	0,40	76,19%	184,56	0,06	46	5 284,32	19,96	9 228,04	2,92	2	1	29,06	2,34	0,78	11,33	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	45	110,79	0,42	75,00%	174,94	0,06	45	5 539,68	20,96	8 747,10	2,77	2	1	27,55	2,34	0,78	10,68	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	44	116,44	0,44	73,68%	166,41	0,05	44	5 821,91	22,06	8 320,67	2,63	2	1	26,20	2,34	0,78	10,11	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	43	122,71	0,47	72,22%	158,81	0,05	43	6 135,50	23,29	7 940,28	2,51	2	1	25,01	2,34	0,78	9,59	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	42	129,72	0,49	70,59%	151,98	0,05	42	6 485,98	24,66	7 599,08	2,41	2	1	23,93	2,34	0,78	9,13	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	41	137,61	0,52	68,75%	145,83	0,05	41	6 880,26	26,20	7 291,52	2,31	2	1	22,96	2,34	0,78	8,71	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	40	146,54	0,56	66,67%	140,26	0,04	40	7 327,12	27,94	7 013,00	2,22	2	1	22,09	2,34	0,78	8,34	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	39	156,76	0,60	64,29%	135,19	0,04	39	7 837,81	29,94	6 759,74	2,14	2	1	21,29	2,34	0,78	8,00	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	38	168,54	0,64	61,54%	130,57	0,04	38	8 427,07	32,24	6 528,54	2,07	2	1	20,56	2,34	0,78	7,68	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	37	182,29	0,70	58,33%	126,33	0,04	37	9 114,53	34,93	6 316,72	2,00	3	1	19,89	2,34	0,78	7,40	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	36	198,54	0,76	54,55%	122,44	0,04	36	9 926,98	38,11	6 122,00	1,94	3	1	19,28	2,34	0,78	7,14	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	35	218,04	0,84	50,00%	118,85	0,04	35	10 901,92	41,92	5 942,42	1,88	3	1	18,71	2,34	0,78	6,89	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	34	241,87	0,93	44,44%	115,53	0,04	34	12 093,50	46,57	5 776,30	1,83	3	1	18,19	2,34	0,78	6,67	non vérifiée				
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	33	271,66	1,05	37,50%	112,44	0,04	33	13 582,99	52,40	5 622,20	1,78	4	2	17,71	2,34	1,56	6,33	vérifiée	7	0,210	2,130	81,61%
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	32	309,96	1,20	28,57%	109,58	0,03	32	15 498,03	59,88	5 478,86	1,73	4	2	17,25	2,34	1,56	6,14	vérifiée	7	0,217	2,123	83,75%
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	31	361,03	1,40	16,67%	106,90	0,03	31	18 051,41	69,86	5 345,19	1,69	5	2	16,83	2,34	1,56	5,96	vérifiée	6	0,224	2,116	107,30%
6	4500	0,68	3,44	0,0009	0,0013	754,75	3158,61	30	432,52	1,68	0,00%	104,40	0,03	30	21 626,14	83,83	5 220,21	1,65	5	2	16,44	2,34	1,56	5,79	vérifiée	6	0,232	2,108	109,87%

**ANNEXE 03 :**

**Comptes d'exploitation prévisionnels en DA  
pour le Mobilab 2**

	Comptes d'exploitation prévisionnels en DA pour le Mobilab 2									
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Chiffres d'affaires	76 800 000	80 640 000	84 672 000	88 905 600	93 350 880	98 018 424	102 919 345	108 065 312	113 468 578	119 142 007
Matières Premières	5 760 000	6 048 000	6 350 400	6 667 920	7 001 316	7 351 382	7 718 951	8 104 898	8 510 143	8 935 651
<b>Valeurs Ajoutées</b>	<b>71 040 000</b>	<b>74 592 000</b>	<b>78 321 600</b>	<b>82 237 680</b>	<b>86 349 564</b>	<b>90 667 042</b>	<b>95 200 394</b>	<b>99 960 414</b>	<b>104 958 435</b>	<b>110 206 356</b>
Frais Financiers	2 436 839	2 436 839	2 436 839	2 436 839	2 436 839	0	0	0	0	0
Frais de personnel	560 000	588 000	617 400	648 270	680 684	714 718	750 454	787 976	827 375	868 744
Utilités	5 710	5 996	6 295	6 610	6 941	7 288	7 652	8 035	8 436	8 858
Assurances et Taxes (2% de I)	194 592	204 321	214 537	225 264	236 528	248 354	260 772	273 810	287 501	301 876
Entretien/ inspection routinière/ services (4% de I)	389 184	408 643	429 075	450 529	473 055	496 708	521 543	547 620	575 001	603 751
Amortissement	1 047 359	3 220 000	3 220 000	3 220 000	3 220 000	3 220 000	3 220 000	0	0	0
Frais de distribution (2% de I)	194 592	204 321	214 537	225 264	236 528	248 354	260 772	273 810	287 501	301 876
<b>Coût Opérateur</b>	<b>4 828 275</b>	<b>7 068 120</b>	<b>7 138 684</b>	<b>7 212 776</b>	<b>7 290 573</b>	<b>4 935 421</b>	<b>5 021 192</b>	<b>1 891 252</b>	<b>1 985 814</b>	<b>2 085 105</b>
<b>Résultats bruts</b>	<b>66 211 725</b>	<b>67 523 880</b>	<b>71 182 916</b>	<b>75 024 904</b>	<b>79 058 991</b>	<b>85 731 621</b>	<b>90 179 202</b>	<b>98 069 162</b>	<b>102 972 621</b>	<b>108 121 252</b>
IBS (30%)	0	0	0	22 507 471	23 717 697	25 719 486	27 053 761	29 420 749	30 891 786	32 436 375
<b>Valeur Ajoutée Net</b>	<b>66 211 725</b>	<b>67 523 880</b>	<b>71 182 916</b>	<b>52 517 433</b>	<b>55 341 294</b>	<b>60 012 135</b>	<b>63 125 442</b>	<b>68 648 414</b>	<b>72 080 834</b>	<b>75 684 876</b>

Valeurs en DZD.