

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



LAVALEF

Département du Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

Mémoire de Master en Génie Chimique

**Modélisation et optimisation de la  
consommation énergétique du procédé  
d'entraînement à la vapeur**

Nadia SEBBAGH

Sous la direction de M. El-Hadi BENYOUSSEF, Professeur

Présenté et soutenu publiquement le 20/06/2017

**Composition du jury :**

Président	M. A. SELATNIA,	Professeur	ENP
Rapporteur	M. E-H. BENYOUSSEF,	Professeur	ENP
Examineurs	M. T. AHMED ZAID,	Professeur	ENP
	M. R. BOUARAB,	Professeur	ENP
Invitée	M <sup>elle</sup> I. AITAMER MEZIANE,	Doctorante	ENP

ENP 2017



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

LVALEF

Département du Génie Chimique

Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles

Mémoire de Master en Génie Chimique

**Modélisation et optimisation de la  
consommation énergétique du procédé  
d'entraînement à la vapeur**

Nadia SEBBAGH

Sous la direction de M. El-Hadi BENYOUSSEF, Professeur

Présenté et soutenu publiquement le 20/06/2017

**Composition du jury :**

Président	M. A. SELATNIA,	Professeur	ENP
Rapporteur	M. E-H. BENYOUSSEF,	Professeur	ENP
Examineurs	M. T. AHMED ZAID,	Professeur	ENP
	M. R. BOUARAB,	Professeur	ENP
Invitée	M <sup>elle</sup> I. AITAMER MEZIANE,	Doctorante	ENP

ENP 2017

## ***DÉDICACE***

*A ma précieuse grande mère, que Dieu la préserve,  
A mes chers parents qui m'ont tant donné,  
A mes deux sœurs Djahida et Hayet,  
A mon frère Hamid,  
A mes adorables neveux issehak et Amyl,  
A toute ma famille, oncles et tantes,  
A tous ceux qui me sont chers.*

*En signe de reconnaissance et de profonde gratitude.*

*S. Nadia*

## **REMERCIEMENTS**

*Ce travail de master a été réalisé au sein du Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles, département de Génie Chimique de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, sous la direction de monsieur E-H. Benyoussef, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique.*

*Tout d'abord, je voudrais adresser mes remerciements à mon encadreur, Monsieur E-H Benyoussef pour la confiance qu'il a bien voulu placer en moi. Je voudrais également lui témoigner de mon immense gratitude pour son aide, sa patience et sa disponibilité tout au long de ce travail et pour m'avoir fait profiter, à chaque fois que le besoin s'en est fait sentir, de ses grandes compétences et ses conseils pertinents.*

*Je remercie infiniment monsieur A. Selatnia, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique pour l'honneur qu'il me fait d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.*

*Je tiens également à remercier :*

*Monsieur T. Ahmed Zaid, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique,  
Monsieur R. Bouarab, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, qui ont accepté d'examiner et de juger ce travail.  
Melle I. AITAMER MEZIANE, doctorante à l'Ecole Nationale Polytechnique, invitée et amie, pour son aide précieuse.*

*Je tiens particulièrement à remercier tous les professeurs qui m'ont enseigné et qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires. Sans oublier de citer également Radia pour son aide et sa gentillesse.*

*Je remercie profondément mes très chers camarades et amis du Génie Chimique pour tous les moments inoubliables que nous avons passés ensemble.*

*Enfin, pour leurs encouragements et leur assistance aussi bien matérielle que morale qui ma permis de faire cette thèse dans de bonnes conditions, je remercie chaudement ma famille et tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.*

## نمذجة و تحسين استهلاك الطاقة في عملية التقطير ببخار الماء

هذا العمل موجه نحو نمذجة و تحسين استهلاك الطاقة في استخراج الزيوت الأساسية عن طريق التقطير ببخار الماء. تحقيقاً لهذه الغاية، وضع نماذج نقل المادة يظهر حركية سريعة في بداية هذه العملية، والتي تتباطأ مع الوقت. كما أن الطاقة الكهربائية هي موحدة خلال كل وقت الاستخراج، المحلول المستخرج في بداية العملية أقل تكلفة من المحلول المستخرج في نهاية الاستخراج. وكان هدفنا الرئيسي للمقارنة بين عمليات الاستخراج ببخار الماء التقليدي والمبتكر وتحديد ظروف التشغيل المثلى. وبعد هذه الدراسة، وجدنا أن عملية الاستخراج بمساعدة أفران ميكروويف اقتصادية للغاية مقارنة بالعملية الكلاسيكية، و وجدنا أنه من المفيد عدم تمديد وقت تقطير الزيوت الأساسية حتى استنفاد النبات وذلك لاستهلاك كبير جداً للطاقة مع نقص معتبر للغاية بالنسبة للغلة.

**كلمات البحث:** التقطير ببخار الماء ، الزيوت الأساسية ، النمذجة، الحركية، استهلاك الطاقة، الموجات الميكرومترية

### Abstract

#### Modeling and optimization of the energy consumption of the steam distillation process

This work focuses on the modeling and optimization of energy consumption during the extraction of essential oils by steam distillation. For this purpose, the modeling of mass transfer shows rapid kinetics at the beginning of the process and tends to slow down over time. Since the electrical power is uniform throughout the extraction time, the extract recovered at the beginning of the process is less expensive than the one obtained at the end of extraction. Our main objectives are compared to the conventional and innovative steam distillation processes and to the determination of the optimum operating conditions. Following this study, we found that the microwave-assisted process is very economical compared to its conventional analogue, and it is more advantageous in terms of energy saving of stops the extraction varies in proportion to the yield .

**Key words:** steam distillation, essential oils, modeling, kinetics, energy consumption, microwaves.

### Résumé

#### Modélisation et optimisation de la consommation énergétique du procédé d'entraînement à la vapeur

Le présent travail est orienté vers la modélisation et l'optimisation de la consommation énergétique lors de l'extraction des huiles essentielles par entraînement à la vapeur d'eau. À cet effet, la modélisation du transfert de matière montre une cinétique rapide au début du processus et qui tend à se ralentir dans le temps. Comme la puissance électrique est uniforme pendant toute la durée d'extraction, l'extrait récupéré en début du processus s'avère moins coûteux énergétiquement que celui obtenu en fin d'extraction. Nos objectifs principaux étaient de comparer entre les procédés d'entraînement à la vapeur d'eau conventionnelle et innovant ainsi que la détermination des conditions opératoires optimales. Suite à cette étude, nous avons constaté que le procédé assisté par micro-ondes est très économe par rapport à son analogue classique, et qu'il est plus avantageux en termes d'économie d'énergie d'arrêt l'extraction lorsque la consommation varie proportionnellement avec le rendement.

**Mots clés :** entraînement à la vapeur d'eau, huiles essentielles, modélisation, cinétique, consommation énergétique, micro-ondes.

# ***TABLE DES MATIÈRES***

**Liste des tableaux**

**Liste des figures**

**Liste des sigles et abréviations**

**Introduction générale** ..... 12

**Chapitre 1: Généralités sur les huiles essentielles** ..... 13

1.1 Introduction ..... 14

1.2 Les huiles essentielles..... 14

1.2.1 Définition des huiles essentielles ..... 14

1.2.2 Localisation de l'huile essentielle au sein de la plante..... 14

1.2.3 Propriétés physiques..... 15

1.2.4 Composition chimique..... 15

1.2.5 Utilisations des huiles essentielles..... 16

1.2.5.1 Industrie pharmaceutiques et cosmétiques ..... 16

1.2.5.2 L'industrie agro-alimentaire ..... 17

1.2.5.3 Industries chimiques ..... 17

1.3 Extraction par entraînement à la vapeur d'eau et procédés similaires ..... 17

1.3.1 Entraînement à la vapeur d'eau ..... 17

1.3.2 L'hydrodiffusion ..... 18

1.3.3 L'extraction assistée par chauffage micro-ondes ..... 19

1.4 Conclusion..... 21

**Chapitre 2: Modèles de transfert de matière** ..... 22

2.1 Introduction ..... 23

2.2 Modèle de transfert de matière ..... 23

2.2.1 Modèle de Koul et al (2004) ..... 23

2.2.2 Sovová et Aleksovski (2006) ..... 24

2.2.3 Modèle de Benyoussef et al (2013)..... 25

2.2.4 Modèle empirique de Babu et Singh (2009) ..... 27

2.2.5 Modèle à deux périodes de temps ..... 28

2.3 Avantages et inconvénients des modèles de transfert de matière ..... 29

2.4 Conclusion..... 29

<b>Chapitre 3: Cinétique d'extraction et modélisation de la consommation énergétique....</b>	<b>30</b>
3.1 Introduction .....	31
3.2 La lavande .....	31
3.3 Cinétique d'extraction des huiles essentielles .....	31
3.4 Modélisation des données cinétiques .....	34
3.5 Modélisation de la consommation énergétique .....	44
3.6 Conclusion.....	52
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>53</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>54</b>



## ***LISTE DES TABLEAUX***

Tableau 2 .1 : Avantages et inconvénients de quelques modèles de transfert de matière.....	29
Tableau 3. 1 : Paramètres des modèles simulés pour la cinétique d'extraction de HE de lavande par SD et MASD (Sahraoui et al, 2012) .....	36
Tableau 3. 2 : Paramètres du modèle simulé pour les cinétiques d'extraction de HE de lavande par SD et MASD (Sahraoui et al, 2012) .....	37
Tableau 3. 3 : paramètres des modèles simulé pour les cinétiques d'extraction de HE de lavande par entrainement à la vapeur d'eau assistée par micro-ondes (Sahraoui et al ,2012)	39
Tableau 3. 4 : Paramètres du modèle simulé pour les cinétiques d'extraction de HE de lavande par MASD (Sahraoui et al, 2012) .....	40
Tableau 3. 5 : paramètres des modèles simulé pour les cinétiques d'extraction de HE de lavande par hydrodiffusion assistée par micro-ondes (Farhat et al ,2009).....	42
Tableau 3. 6 : Paramètres du modèle simulé pour les cinétiques d'extraction de HE de lavande par MASD (farhat et al, 2009) .....	43
Tableau 3. 7 : Données relatives à l'extraction d'huile essentielle dans les conditions optimales par MSDF et SDF .....	49
Tableau 3. 8: Calculs de l'énergie globale consommée pour le procédé MSDF différentes puissances.....	50

## ***LISTE DES FIGURES***

Figure 1. 1 : Schéma de principe de l'entraînement à la vapeur (Sahraoui et al, 2012) .....	18
Figure 1. 2 : Schéma de principe de l'Hydrodiffusion (Sahraoui et al , 2012) .....	18
Figure 1. 3 : Transferts thermiques sous les deux modes de chauffage (Lucchesi, 2005).....	19
Figure 1. 4 : Un pilote d'extraction des épices et aromates par la technique MAP (Eskilsson et Bjorklund, 2000).....	20
Figure 1. 5 : Schéma d'une installation d'entraînement à l'air assisté par micro-ondes (Lucchesi, 2005).....	20
Figure 1. 6 : Schéma de principe de l'entraînement à la vapeur assisté par micro-ondes (Sahraoui et al, 2012). .....	21
Figure 3. 1 : Cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par MSD et SD (Sahraoui et al, 2012) .....	32
Figure 3. 2 : Cinétiques d'extraction de l'huile essentielle de lavande par entraînement à la vapeur d'eau (Sahraoui et al, 2012) .....	33
Figure 3. 3 : Cinétiques d'extraction de l'huile essentielle de lavande par hydrodiffusion (Farhat et al, 2009) .....	34
Figure 3. 4 : Simulation de la cinétiques d'extraction pour la MASD (Sahraoui et al, 2012). 35	35
Figure 3. 5 : Simulation de la cinétique d'extraction obtenue par la SD (Sahraoui et al, 2012) .....	35
Figure 3. 6 : Simulation des cinétiques d'extraction pour la MASD et SD (Sahraoui et al, 2012).....	36
Figure 3. 7 : Simulation de la cinétique d'extraction obtenue pour une puissance de chauffe égale à 200 W (Sahraoui et al, 2012) .....	37
Figure 3. 8 : Simulation de la cinétique d'extraction obtenue pour une puissance de chauffe égale à 300 W (Sahraoui et al, 2012) .....	37
Figure 3. 9 : Simulation de la cinétique d'extraction obtenue pour une puissance de chauffe égale à 400 W (Sahraoui et al, 2012) .....	38
Figure 3. 10 : Simulation de la cinétique d'extraction obtenue pour une puissance de chauffe égale à 500 W (Sahraoui et al, 2012) .....	38
Figure 3. 11 : Simulation de la cinétique d'extraction obtenue pour une puissance de chauffe égale à 700 W (Sahraoui et al, 2012) .....	38
Figure 3. 12 : Simulation de la cinétique d'extraction d'huile essentielle de lavande par MASD (sahraoui et al ,2012) .....	40
Figure 3. 13 : Simulation de la cinétique d'extraction obtenue pour une puissance de chauffe égale à 50 W (Farhat et al, 2009) .....	41
Figure 3. 14 : Simulation de la cinétique d'extraction obtenue pour une puissance de chauffe égale à 100 W (Farhat et al, 2009) .....	41
Figure 3. 15 : Simulation de la cinétique d'extraction obtenue pour une puissance de chauffe égale à 200, 300 et 400 W (Farhat et al, 2009) .....	42
Figure 3. 16 : simulation de la cinétique d'extraction d'huile essentielle de lavande par MSDF (farhat et al, 2009) .....	43

Figure 3. 17 : Simulation de la consommation énergétique en fonction du rendement de l'extraction (sahraoui et al ,2012) .....	46
Figure 3. 18 : Comparaison de la consommation énergétique pour les différents rendements en HE (sahraoui et al ,2012).....	46
Figure 3. 19: Simulation de la consommation énergétique en fonction du rendement de l'extraction (sahraoui et al ,2012) .....	47
Figure 3. 20 : Comparaison de la consommation énergétique pour les différents rendements en HE (sahraoui et al ,2012).....	48
Figure 3. 21: Énergie consommée en fonction des puissances délivrées par le four à micro-ondes (sahraoui et al ,2012).....	48
Figure 3. 22 : Simulation de la consommation énergétique en fonction du rendement de l'extraction (Farhat et al ,2009).....	50
Figure 3. 23: Comparaison de la consommation énergétique pour les différents rendements en HE (Farhat et al ,2009).....	51
Figure 3. 24 : Énergie consommée en fonction des puissances délivrées par le four à micro-ondes (Farhat et al ,2009).....	51

## ***LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS***

$E_f$	l'énergie consommée par le four micro-ondes
$E_{g.v}$	l'énergie consommée par le générateur de vapeur
$f$	Fraction de l'huile essentielle dans les cellules externes
$G$	La fraction initiale de l'extrait dans les cellules ouvertes
$g_1$	fraction du constituant majoritaire 1
$g_2$	fraction du constituant majoritaire 2
$k$	Paramètre du modèle de Koul (2004) [ $s^{-1}$ ]
$k_v$	Le coefficient de partage du soluté entre les phases vapeur et liquide
$k_w$	Le coefficient de partage du soluté entre l'huile des cellules cassées et la phase liquide
$k$	Constante cinétique [ $s^{-1}$ ]
$m$	La quantité de l'huile essentielle résiduelle [kg] (modèle de Koul, 2004)
$m_0$	Quantité initiale de l'huile essentielle dans le solide [kg] (modèle de Koul, 2004)
$N$	Masse de la matière végétale [kg] (modèle de Sovova et Aleksovski, 2006)
$P$	la puissance consommée
$Q$	Débit de vapeur [kg/s]
$q_\infty$	Le rendement en huile à l'équilibre [g/g]
$q(t)$	Masse de soluté diffusé à l'instant t
$q_e$	La quantité de soluté adsorbé à l'équilibre
$x_i$	Concentration de l'huile dans les cellules intactes [g d'huile/ kg de matière végétale]
$x_b$	Concentration de l'huile dans les cellules cassées [g d'huile/ kg de matière

	végétale][g d'huile/ kg d'eau]
$x_s$	Concentration de l'huile essentielle dans le courant liquide de recyclage
$x_u$	Concentration de l'huile dans le solide avant traitement [g d'huile/ kg de matière végétale]
$x_v$	Concentration de l'huile dans la phase vapeur [g d'huile/ kg d'eau]
$x_w$	Concentration de l'huile dans l'eau bouillante [g d'huile/ kg d'eau]
$y_\infty$	Rendement en huile essentielle à l'équilibre
$y(t)$	Rendement en huile essentielle à l'instant t
HE	Huile essentielle
SD	Entraînement à la vapeur d'eau
MASD	Entraînement à la vapeur d'eau assistée par micro-ondes
SDF	Hydrodiffusion
MSDF	Hydrodiffusion assistée par micro-ondes

# *INTRODUCTION GÉNÉRALE*

Le développement durable et la préservation de l'énergie sont aujourd'hui des enjeux plus que majeurs pour les industries et particulièrement les industries chimiques souvent pointées du doigt lorsqu'il s'agit d'économie d'énergie.

Dans le domaine de l'extraction des produits naturels et particulièrement des huiles essentielles, l'entraînement à la vapeur d'eau et l'hydrodistillation restent les méthodes d'extraction les plus utilisées à l'échelle industrielle. Seulement ces méthodes sont réputées pour être de grandes consommatrices d'énergie et d'eau.

Afin de réaliser des économies d'énergie et adapter ces procédés d'extraction aux exigences actuelles en termes d'économie d'énergie, de nouveaux procédés, utilisant d'autres sources d'énergie (micro-ondes, ultrasons) ont vu le jour et ont montré une grande efficacité énergétique.

Dans cette optique, nous nous sommes intéressés à la modélisation et l'optimisation de la consommation énergétique lors de l'extraction des huiles essentielles par entraînement à la vapeur. Et cela dans le but d'élaborer un modèle décrivant l'évolution de cette consommation énergétique au cours du processus d'extraction et d'aboutir à des recommandations permettant de rationaliser la consommation énergétique de ces procédés.

Ainsi, notre travail est structuré en trois chapitres:

Le premier chapitre, est consacré aux huiles essentielles (définition, composition chimique, utilisation, ...) ainsi que aux méthodes d'extraction par entraînement à la vapeur d'eau.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté quelques travaux modélisant les cinétiques d'extraction des huiles essentielles.

Le dernier chapitre, est réservé à la description de la démarche adoptée pour modéliser l'évolution de la consommation énergétique lors de l'extraction des huiles essentielles par l'entraînement à la vapeur d'eau classique et assisté par micro-ondes.

# **Chapitre 1**

## **Généralités sur les huiles essentielles**

## 1.1 Introduction

Les huiles essentielles sont de plus en plus reconnues pour leurs bienfaits sur le bien-être et la santé. Utilisées à des fins multiples, depuis la plus haute antiquité, ces substances offrent de nombreux avantages, en termes de qualité et d'impact environnemental.

Le présent chapitre est consacré aux huiles essentielles (définition, composition chimique,...) ainsi que les procédés d'extraction par entraînement à la vapeur d'eau et procédés similaires.

## 1.2 Les huiles essentielles

### 1.2.1 Définition des huiles essentielles

L'Association Française de Normalisation (AFNOR, 2000), a défini les huiles essentielles comme étant des produits obtenus soit à partir de 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.

L'Encyclopédie Funk et Wagnalls (Funk et Wagnalls, 2004) décrit les huiles essentielles comme des liquides volatils, la plupart du temps insolubles dans l'eau, mais solubles dans l'alcool, l'éther et les huiles végétales et minérales. Elles sont habituellement non huileuses au contact de la peau. Leurs composants peuvent être regroupés en six classes selon leur structure chimique :

- Les hydrocarbures, tel que le limonène dans l'huile de citron;
- Les alcools, tel que le bornéol dans le camphrier de Bornéo;
- Les esters, tel que le salicylate de méthylique dans l'huile de wintergreen;
- Les aldéhydes, tel que l'aldéhyde benzoïque dans l'huile d'amandes amères;
- Les cétones, telle que la menthone dans l'huile de menthe poivrée;
- Les lactones et oxydes, telle que la coumarine des haricots de Tonka.

### 1.2.2 Localisation de l'huile essentielle au sein de la plante

Toutes les parties des plantes aromatiques, tous leurs organes végétaux, peuvent contenir de l'huile essentielle (Bruneton, 1993). (fleurs, feuilles, organes souterrains, fruits, graines, le bois et les écorces)

Les huiles essentielles sont synthétisées dans le cytoplasme des cellules végétales spécialisées. Elles s'accumulent en général dans des structures glandulaires variables suivant les familles botaniques. Elles sont localisées en surface sous la cuticule pour une sécrétion exogène ou en profondeur dans les tissus parenchymateux pour une sécrétion endogène (Guenther, 1948).

Ces structures peuvent être des cellules sécrétrices (Lauraceae, Magnoliaceae, Zingiberaceae), des poils sécréteurs (Labieae et Geraniaceae), des poches sécrétrices (Myrtaceae et Rutaceae) ou des canaux sécréteurs (Ombelifereae et Conifereae)(Gilly, 2005).



La teneur des plantes en huiles essentielles est faible ; elle est de l'ordre de 1 à 3 % à l'exception du clou de Girofle (14 à 19 %), du Macis (10 à 13 %), de la noix de muscade (8 à 9 %) et de la Cardamome (4 à 10 %)

Parmi les familles végétales les plus productrices d'huiles essentielles, on distingue les Labiaceae (famille du thym, de la lavande, de la menthe, du basilic etc..), les Asteraceae (camomille, absinthe...), les Myrtaceae (eucalyptus, melaleuca, myrte, girofle...), les Lauraceae (cannelle, laurier...).

### 1.2.3 Propriétés physiques

Les huiles essentielles sont incolores ou jaune pâle, volatiles, odorantes et inflammables (Wichtk, 1999). Elles sont généralement liquides à température ordinaire. Leurs densités sont inférieures à la densité de l'eau sauf exceptions (huiles essentielles de Cannelle, girofle en particulier).

Elles ne sont pas solubles dans l'eau mais en revanche elles le sont dans les solvants organiques et huiles végétales (Bruneton, 1995).

L'indice de réfraction des huiles essentielles est souvent utilisé pour l'identification et comme critère de pureté des huiles essentielles et de composés liquides divers. Chaque substance a son indice de réfraction spécifique.

### 1.2.4 Composition chimique

Les huiles essentielles sont des mélanges complexes de différents constituants chimiques. Cependant, ces constituants peuvent être regroupés en deux grands groupes chimiques en fonction de leurs origines biogénétiques bien distinctes .il y a le groupe des terpénoïdes et des composés aromatiques (Teisseire, 1991).

Dans les huiles essentielles nous ne pouvons rencontrer que les terpènes (hydrocarbure de formule brute  $C_{10}H_{16}$  produit par le métabolisme secondaire des plantes) les plus volatils. C'est à dire les terpènes dont la masse moléculaire n'est pas trop élevée (lamarti et al, 1994) comme :

- Les terpénoïdes sont en général très nettement dominants : monoterpènes et sesquiterpènes. Ils se présentent sous forme de carbures (myrcène, ocimène, bisabolène, caryophyllène...), d'alcools (géraniol, menthol, terpinéol...), d'aldéhydes (géraniol, santalal, citronellal...), de phénols (thymol, carvacrol...), de cétones (menthone, thuyone, pulégone, vétivone...), d'esters (acétate de linalyle, de menthyle, de cédryle ...), d'éther (cinéole) (Teisseire, 1991).

Ces terpénoïdes ont une structure acyclique ou cyclisée ; plus la chaîne carbonée est longue plus les cyclisations sont possibles.

- Les composés aromatiques sont moins fréquents mais néanmoins très importants : eugénol, anéthole, safrole, asarone, fenchone, myristicine, apiole (Teisseire, 1991).

Cependant la composition chimique d'une huile essentielle peut varier considérablement :

- dans une même plante selon les organes (feuille, fleur, fruit, bois)
- dans l'année selon la saison pour une même plante,
- selon les conditions de culture pour une même souche végétale (ensoleillement, humidité, longueur du jour, fertilité du sol),
- selon les races chimiques (ou chimiotypes) pour une même espèce (l'exemple classique est le thym avec 7 races chimiques).

Connaître avec exactitude les constituants d'une huile essentielle est fondamental, à la fois pour vérifier sa qualité, expliquer ses propriétés et prévoir sa toxicité potentielle.

## 1.2.5 Utilisations des huiles essentielles

Il existe une grande variété d'huiles essentielles connues dans le monde et plusieurs milliers d'entre elles ont été caractérisées. Cependant, de ce nombre, une faible proportion seulement présente un intérêt commercial. Cela s'explique par la composition chimique des huiles, les différentes utilisations possibles et leur coût de production. On évalue qu'environ 300 produits naturels servent de matières premières pour l'industrie des parfums et des arômes (Bakkali et al, 2012).

Les huiles essentielles constituent une matière première destinée à divers secteurs d'activités (Balandrin, 1985) tels que la parfumerie, la cosmétologie, l'agro-alimentaire et l'industrie chimique. Deux industries se partagent le marché mondial florissant des huiles ; il s'agit de l'industrie agroalimentaire et la parfumerie.

### 1.2.5.1 Industrie pharmaceutiques et cosmétiques

Plus généralement, la phytothérapie, ou l'art d'utiliser des substances issues des plantes dans la médecine, est connue de tous temps et de toutes civilisations tandis que la naissance de l'aromathérapie moderne (l'utilisation médicale des extraits aromatiques de plantes, et non d'éléments complets d'une plante) est attribuée au chimiste René Maurice Gattefossé, dans les années 1920.

Au niveau des effets et des utilisations dans les domaines pharmaceutiques et/ou cosmétiques, ils sont variés. Les huiles essentielles sont utilisées pour leurs différentes propriétés et effets thérapeutiques divers (Franchomme, 1990).

- les effets anti-infectieux; notamment sur les souches résistant à des antibiotiques récents. Parmi ces molécules antibactériennes les plus puissantes, nous pouvons citer: le Carvacrol, le Thymol et l'Eugénol, le Géraniol, le Linalol, Térpineol menthol, etc. Cette activité antivirale se retrouve surtout dans les huiles essentielles contenant des cétones, des monoterpènes ou certains aldéhydes ;
- des effets calmants et antispasmodiques; les aldéhydes (cital de la verveine,...), les esters (salicylate de méthyle,...) ;
- des effets antiparasitaires; surtout les phénols ;
- des effets anti-inflammatoires; selon le type de douleurs, on peut utiliser les esters, des alcools (menthol) ou des aldéhydes (cuminal).

### **1.2.5.2 L'industrie agro-alimentaire**

L'industrie alimentaire utilise les huiles essentielles pour rehausser le goût des aliments, pour parfumer et colorer (Heath, 1981). Le secteur des boissons gazeuses s'avère un gros consommateur d'huiles. En effet, l'utilisation des huiles essentielles dans les arômes alimentaires est en train de se développer énormément vu l'omniprésence des arômes. De nos jours, ils sont utilisés comme « rehausseurs » de goût dans divers produits comme les cafés, tabacs, thés, vins, yaourts...

Dans ce secteur, les volumes d'huiles essentielles peuvent être très importants. L'huile la plus utilisée dans le monde est l'huile essentielle d'orange.

### **1.2.5.3 Industries chimiques**

Les industries chimiques utilisent les huiles essentielles comme matières premières pour la synthèse de principes actifs médicamenteux, de vitamines et de substances odorantes (Bruneton, 1993).

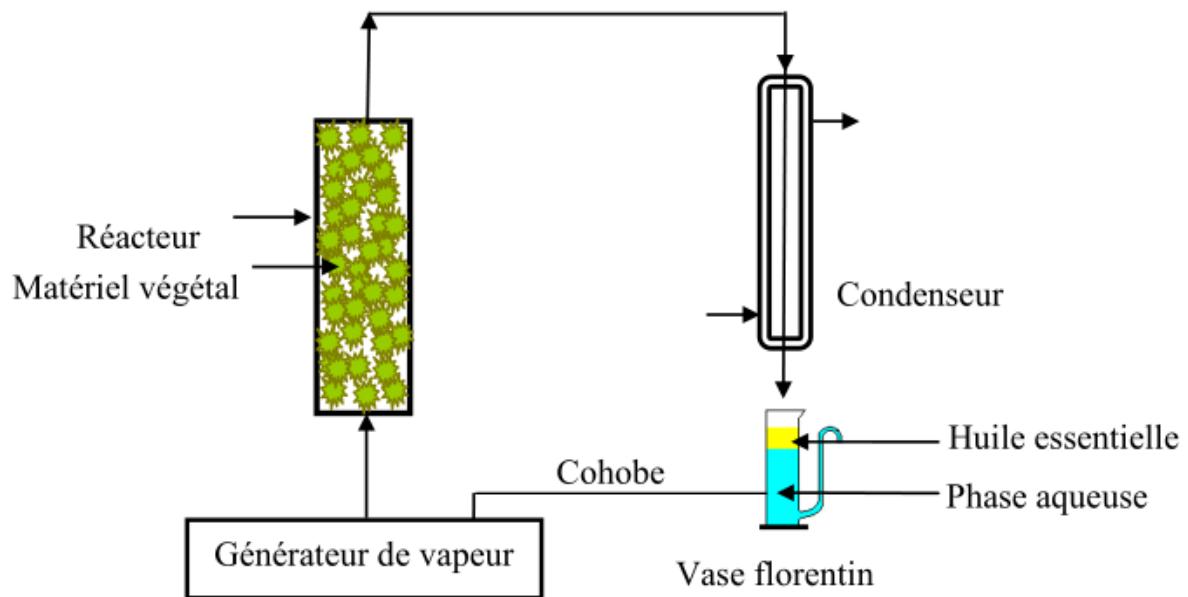
Les huiles essentielles entrent dans la composition des produits d'entretien et de dégraissage. Le d-limonène employé depuis cinquante ans comme arôme, est de plus en plus utilisé ces dernières années comme nettoyant et dégraissant. On le retrouve dans l'entretien mécanique, la fabrication de produits métalliques, le nettoyage du fuselage des avions et le nettoyage des modules de circuits imprimés (Dubey, 2012)

## **1.3 Extraction par entraînement à la vapeur d'eau et procédés similaires**

### **1.3.1 Entraînement à la vapeur d'eau**

Datant de plus d'un millénaire, il s'agit de la méthode la plus ancienne et la plus utilisée pour obtenir une huile essentielle de qualité (Likens, 1964). Elle consiste à faire passer un courant de vapeur d'eau dans une cuve contenant les plantes. Sous l'action de l'humidité et de la chaleur les huiles essentielles volatiles se libèrent. Ensuite cette vapeur d'eau et d'huile essentielle passe dans un serpentin refroidi par de l'eau. La vapeur se condense alors dans le serpentin, et retourne à l'état liquide. Ce liquide, mélange d'eau et d'huile essentielle est recueilli dans un essencier qui sépare les deux éléments. En effet, l'huile essentielle est non miscible à l'eau et plus légère donc elle se retrouve dans la partie supérieure de l'essencier (Crouzet, 1996).

L'ensemble du dispositif utilisé pour l'entraînement à la vapeur d'eau est nommé l'alambic. Ce dispositif est composé d'une cuve dans laquelle on place les plantes à distiller. Les plantes sont dissociées de l'eau dans la même cuve. La cuve est chauffée et recouverte par un chapiteau qui est prolongé par un col de cygne, celui-ci est raccordé à un serpentin de refroidissement. Pour cela, celui-ci est plongé dans une cuve d'eau froide. Le serpentin débouche sur l'essencier, muni de deux robinets. Celui du bas permet de recueillir l'hydrolat ou eau florale et celui du haut l'huile essentielle.

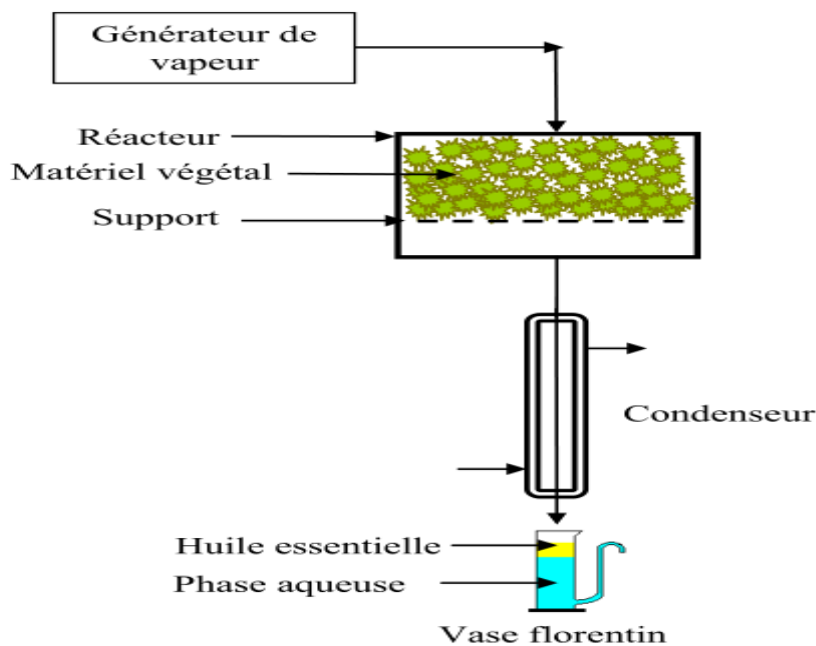


**Figure 1. 1 :** Schéma de principe de l'entraînement à la vapeur (Sahraoui et al, 2012)

### 1.3.2 L'hydrodiffusion

Ce procédé a été breveté par Schmidt SA (Schmidt, 1981). Le principe de l'hydrodiffusion est similaire à celui de l'entraînement seulement dans le cas de l'hydrodiffusion, le flux de vapeur n'est pas ascendant mais descendant.

Comme pour l'entraînement à la vapeur d'eau, l'hydrodiffusion présente l'avantage de ne pas mettre en contact le matériel végétal et l'eau. De plus, l'hydrodiffusion permet une économie d'énergie due à la réduction de la durée de la distillation et donc à la réduction de la consommation de vapeur.



**Figure 1. 2 :** Schéma de principe de l'Hydrodiffusion (Sahraoui et al, 2012)

### 1.3.3 L'extraction assistée par chauffage micro-ondes

L'avantage essentiel de ce procédé est de réduire considérablement la durée de distillation (ramenée à quelques minutes) et incrémente le rendement d'extrait. Cependant l'irradiation d'un volume important pose des problèmes techniques.

#### 1.3.3.1 Le chauffage micro-ondes

Le transfert de chaleur sous chauffage micro-ondes est complètement inversé par rapport au chauffage conventionnel. Le transfert de chaleur classique se transmet de l'extérieur vers l'intérieur du récipient. Sous chauffage micro-ondes, le volume traité devient lui même source de chaleur. On parle de dégagement de la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur du récipient.

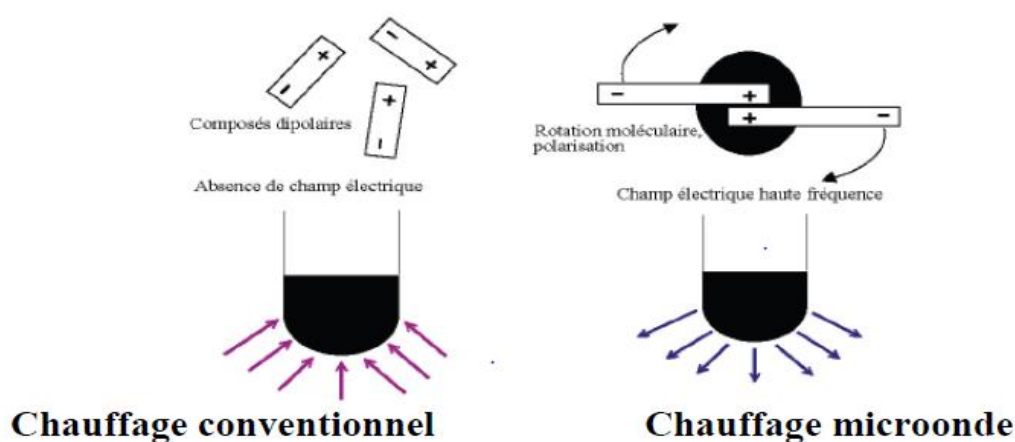


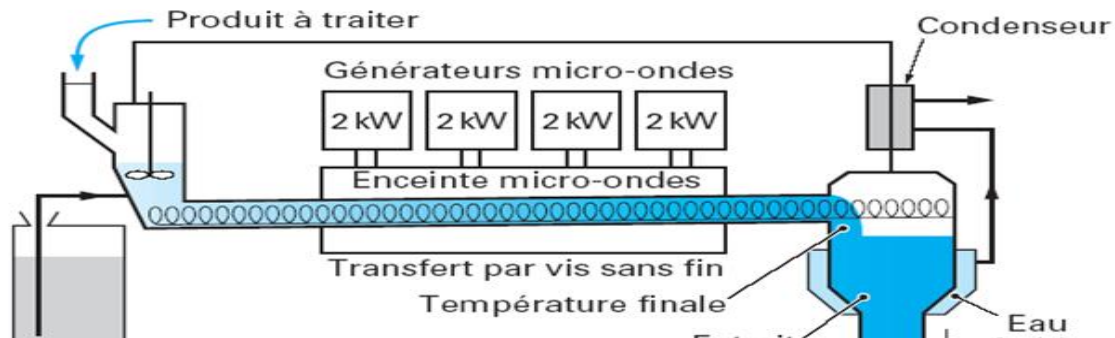
Figure 1. 3 : Transferts thermiques sous les deux modes de chauffage (Lucchesi, 2005)

#### 1.3.3.2 Extraction par solvant assistée par micro-ondes

La méthode d'extraction par solvant assistée par micro-ondes a été mise au point par l'équipe canadienne de Paré et ses collaborateurs (Paré et al, 1990). Celle-ci a déposé le premier brevet européen sur l'extraction de produits naturels assistée par micro-ondes. Ces auteurs proposaient de traiter sous micro-ondes un solide, sec ou humide, en contact avec un solvant partiellement ou totalement transparent aux micro-ondes qui permettent d'accélérer la cinétique d'extraction et de réduire le rapport solvant/charge.

Des essais effectués par cette nouvelle technique notamment sur la menthe, ont souligné le gain de temps ainsi que la similitude de la qualité des produits à ceux obtenus par entraînement à la vapeur classique. De nombreux brevets seront déposés alors par Paré et son équipe tant au niveau américain qu'au niveau européen (Paré et al, 1990 ; Paré et al, 1991 ; Paré, 1994). Le procédé original sera par la suite quelque peu modifié et enrichi et sera dénommé : MAP (Microwave Assisted Process). Il a pour vocation d'être une méthode d'extraction utilisable pour un grand nombre de matrices solides ou liquides telles que les végétaux mais aussi les tissus animaux, les sols, les cosmétiques ou les eaux polluées.

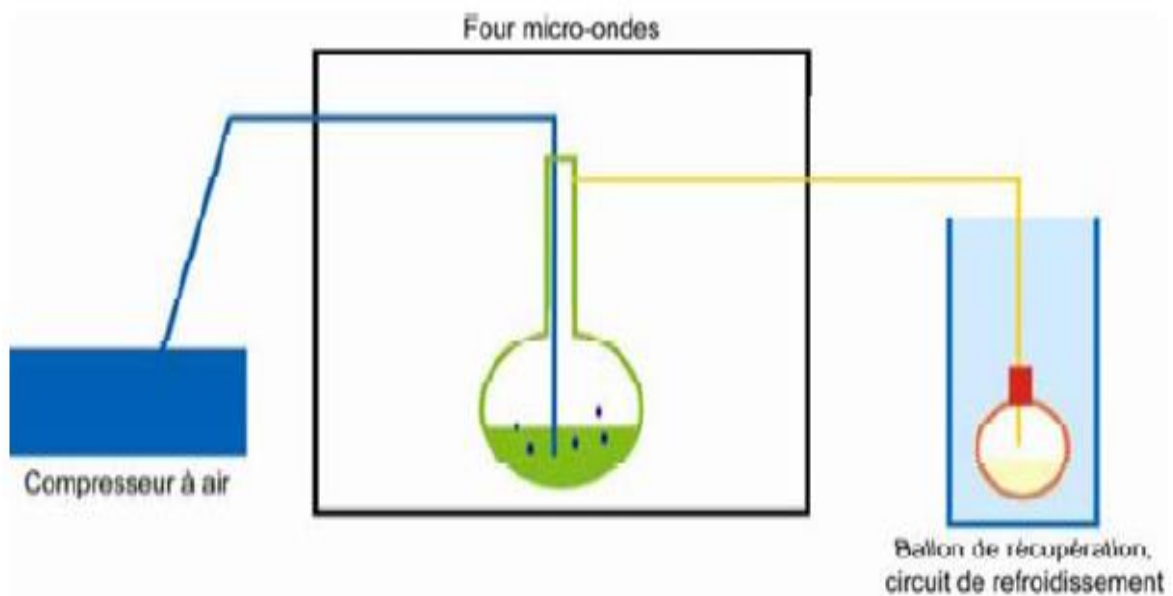
Actuellement l'extraction assistée par micro-ondes (MAE : Microwave Assisted Extraction) est actuellement très généralement citée dans la littérature (Eskilsson et Bjorklund, 2000). En réalité, la MAE et MAP sont toutes deux des techniques d'extraction par solvant assistée par micro-ondes. A titre d'exemple, un pilote d'extraction des épices et aromates par la technique MAP est présenté dans la figure (1.4) suivante:



**Figure 1. 4 :** Un pilote d'extraction des épices et aromates par la technique MAP (Eskilsson et Bjorklund, 2000)

### 1.3.3.3 Entraînement à l'air assisté par micro-ondes

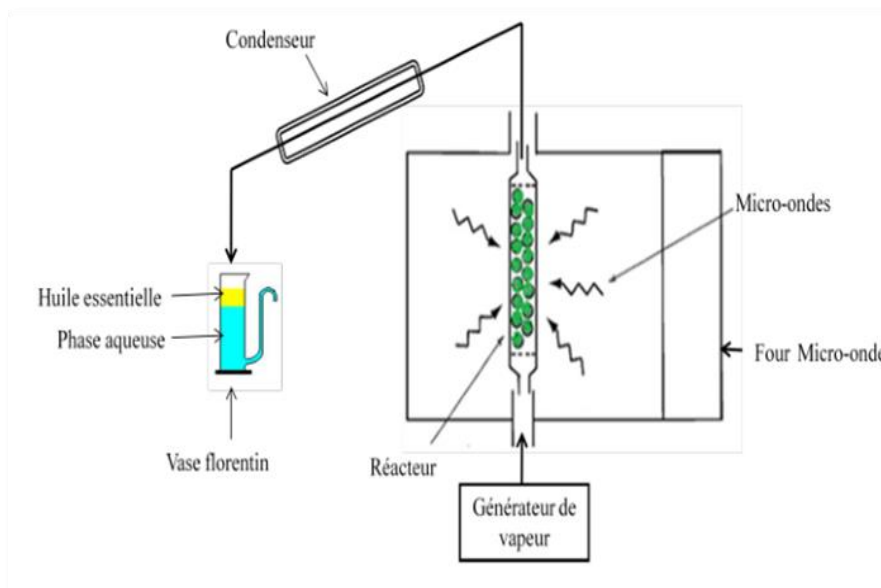
En 1989, Craveiro et ses collaborateurs (Craveiro et al, 1989), ont proposé une technique originale d'extraction de l'huile essentielle de Lippiasidoides par chauffage micro-ondes sans solvant en utilisant un compresseur à air. L'huile essentielle extraite en 5 minutes sous chauffage micro-ondes était présentée comme qualitativement identique à celle obtenue en 90 minutes par entraînement à la vapeur. Le système proposé est inspiré du procédé d'entraînement à la vapeur d'eau classique. Il se compose en fait de trois parties : un compresseur envoyant de l'air dans le ballon où se trouve la matière végétale placée dans un four micro-ondes domestique, comme la montre la figure ci-dessous :



**Figure 1. 5 :** Schéma d'une installation d'entraînement à l'air assisté par micro-ondes (Lucchesi, 2005)

### 1.3.3.4 Entraînement à la vapeur assisté par micro-ondes (MASD)

L'entraînement à la vapeur assisté par micro-ondes (MASD) a été développé par Sahraoui et ses collaborateurs (Sahraoui et al, 2012). Le procédé repose sur le principe de l'entraînement à la vapeur d'eau classique, dans lequel le réacteur d'extraction est placé dans un four micro-ondes. Le système de réfrigération ainsi que la partie prévue pour la récupération de l'huile essentielle sont placés à l'extérieur du four micro-ondes.



**Figure 1. 6 :** Schéma de principe de l'entraînement à la vapeur assisté par micro-ondes (Sahraoui et al, 2012).

## 1.4 Conclusion

Les industries, qu'elles soient cosmétiques, pharmaceutiques ou aromatiques sont très friandes d'huiles essentielles car ce sont les produits les plus susceptibles d'ajouter des odeurs. Ceci s'explique par le fait qu'elles ont une forte volatilité, et qu'elles ne laissent aucune trace grasse. Dès lors, l'industrie agro-alimentaire s'en sert également afin d'incorporer des saveurs aux aliments.

L'entraînement à la vapeur est parmi les méthodes les plus couramment utilisées dans le domaine de l'extraction des huiles essentielles. Le développement des nouvelles méthodes telle que les méthodes assistées micro-ondes a permis de minimiser considérablement le temps d'extraction.

# **Chapitre 2**

## **Modèles de transfert de matière**



## 2.1 Introduction

La modélisation mathématique des cinétiques d'extraction permet de décrire les problèmes de transfert de matière qui sont généralement complexes par l'établissement de modèles à paramètres significatifs, permettant ainsi une meilleure compréhension du phénomène, une meilleure description de l'évolution du rendement d'extraction mais aussi l'optimisation des techniques utilisées.

L'objectif principal de ce deuxième chapitre, est de rapporter quelques travaux effectués par les différents auteurs qui se sont intéressés à la modélisation du transfert de matière entre phases lors de l'extraction des essences végétales et d'expliquer leurs approches du phénomène.

## 2.2 Modèle de transfert de matière

### 2.2.1 Modèle de Koul et al (2004)

Koul et ses collaborateurs (Koul et al, 2004) ont proposé un modèle du pseudo premier ordre pour décrire l'extraction par entraînement à la vapeur d'eau de l'huile essentielle de citron. Selon ces auteurs, la quantité d'huile extraite par unité de temps est proportionnelle à la quantité d'huile restante.

Ainsi :

$$-\frac{dm}{dt} = km \quad (2.1)$$

Après intégration, on obtient

$$\frac{\ln m_0}{m} = kt \quad (2.2)$$

Le modèle de premier ordre s'écrit donc sous la forme

$$m = m_0(1 - e^{-kt}) \quad (2.3)$$

Où :

$m$  : la quantité de l'huile essentielle résiduelle dans le solide.

$m_0$  : quantité initiale de l'huile essentielle dans le solide.

$k$  : paramètre du modèle.

Ces auteurs ont aussi montré que l'augmentation du débit de vapeur ainsi que le broyage de la matière végétale favorisent l'augmentation du rendement en huile essentielle.

### 2.2.2 Sovová et Aleksovski (2006)

Sovová et Aleksovski (Sovova et al, 2006), ont élaboré un modèle selon lequel on peut distinguer deux types de cellules végétales, cassées et intactes, au sein des particules solides. Les cellules cassées par le prétraitement mécanique sont localisées près de la surface des particules, tandis que le noyau des particules contient des cellules intactes, par conséquent, l'huile essentielle localisée dans des cellules à parois cassées est facilement extractible par contre l'autre fraction qui se trouve dans des cellules à parois intactes est plus difficile à extraire.

#### Hypothèses du modèle :

- L'huile essentielle est un pseudo-composant.
- La masse d'eau dans la phase vapeur est négligée devant la masse d'eau bouillante.
- les particules ont la même taille, la même forme, et le même contenu en huile initialement;
- initialement, la fraction ( $f$ ) d'huile essentielle est présente dans les cellules cassées, facilement accessibles, et la fraction ( $1 - f$ ) est présente dans les cellules intactes;
- la résistance au transfert de matière est supposée négligeable dans les cellules végétales cassées, l'eau bouillante et la phase vapeur et un équilibre thermodynamique est établi ainsi quasi instantanément entre les phases

$$x_v = k_v x_w = k_v k_w x_b \quad (2.4)$$

$x_b$  : la concentration massique d'huile dans les cellules cassées, g (huile).Kg<sup>-1</sup> (végétal),

$x_v$  : la concentration massique de l'huile dans la phase vapeur, g (huile). Kg<sup>-1</sup> (vapeur),

$x_w$  : la concentration massique en huile dans l'eau bouillante, g (huile). Kg<sup>-1</sup> (eau),

$k_v$  : le coefficient de partage du soluté entre les phase vapeur et liquide,

$k_w$  : le coefficient de partage du soluté entre l'huile des cellules cassées et la phase liquide.

$x_s$ : la concentration massique en composés hydrosolubles dans le flux de cohobage.

- Avant traitement (broyage et extraction), la concentration de l'huile dans les cellules intactes est :  $x_i(t=0) = x_u$

Avec :  $x_u$  : concentration de l'huile dans le solide avant traitement.

$x_i$ : concentration de l'huile dans les cellules intactes.

En notant la concentration  $x_s$  de l'huile essentielle dans le courant liquide de recyclage (de Cohobage), supposée constante, Le rendement en huile essentielle s'écrit ainsi :

$$y = \frac{Q}{N} \int_0^t (x_v - x_s) dt \quad (2.5)$$

Avec : Q : débit de vapeur kg/s

N : masse de la matière végétale kg

Ce modèle a été établi en posant les équations de vitesses de transfert et les conditions initiales relatives à chaque type de cellules. L'équation du rendement a été obtenue en résolvant, par la transformée de Laplace, les équations de bilan de matière sur l'huile à l'intérieur du ballon.

Le rendement en huile essentielle correspondant à deux constantes de temps est donné par l'expression suivante :

$$Y = Y_{\infty} \left( 1 - f \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) - (1 - f) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right) \quad (2.6)$$

### 2.2.3 Modèle de Benyoussef et al (2013)

Dans cette étude, Benyoussef et ses collaborateurs (Benyoussef et al, 2013), ont mis en évidence l'influence de la composition d'huile essentielle sur la cinétique d'extraction des graines de coriandre et ont pu développer un modèle qui se base sur la contribution de chaque constituant d'huile. Ce travail a remis en question la validité de l'hypothèse simplificatrice qui considère l'huile essentielle comme étant un pseudo-composant.

En effet selon ces auteurs, l'huile essentielle peut être considérée comme un pseudo-composant que dans les deux cas suivants :

- Le changement dans la composition d'huile essentielle est peu significatif durant tout le processus d'extraction.
- Un changement insignifiant dans la constante cinétique.

#### Hypothèses du modèle :

- chaque constituant de l'huile est considéré comme un composé unique avec des propriétés physiques et diffusionnelles constantes.
- chaque constituant de l'huile essentielle peut être décrit par une cinétique du premier ordre.

Le rendement en huile essentielle total serait ainsi la somme des rendements relatifs à chaque composé :

$$y = \sum y_i^{\infty} (1 - e^{-k_i t}) \quad (2.7)$$

$$\frac{y(t)}{y_{\infty}} = \sum_{i=1}^n \frac{y_{\infty i}}{y_{\infty}} (1 - \exp(-k_i * t)) \quad (2.8)$$

**Avec :**

i : indice du composé

k: constante cinétique.

Ce dernier modèle, appelé modèle général de contribution des constituants (GMCC) est difficile à appliquer du fait qu'il contient un très grand nombre de termes. Étant donné que l'huile essentielle peut être caractérisée par deux ou trois composants majoritaires, une simplification du dernier modèle peut être faite tout en garantissant une bonne précision.

Ainsi, un modèle plus simplifié appelé (SMCC) a été développé, le nombre de termes de ce dernier dépend du nombre de constituants majoritaires de l'huile essentielle. Deux modèles ont été développés et testés par les auteurs.

SMCC1 (simplified model of components contribution) : ce modèle est valable lorsque l'huile essentielle pourrait être caractérisée par un seul constituant majoritaire. Et se présente sous la forme :

$$Y(t) = Y_{\infty}(1 - fe^{-k_1t} - (1 - f)e^{-k_2t}) \quad (2.9)$$

Où

$Y(t)$  : le rendement à un temps  $t$

$Y_{\infty}$  : le rendement à l'équilibre

$f$  : Fraction du constituant majoritaire

$1 - f$  : Fraction des autres constituants

$k_1, k_2$  les constantes cinétiques du constituant majoritaire et des autres constituants respectivement

Ce modèle est identique aux modèles développés par (Milojevic et al, 2015) et (Sovova et al, 2006) même si l'approche n'est pas la même.

SMCC2 qui considère que l'huile essentielle serait constituée de deux constituants majoritaires, il est décrit par l'équation suivante :

$$y(t) = y_{\infty}(1 - g_1e^{-k_1t} - g_2e^{-k_2t} - (1 - g_1 - g_2)e^{-k_3t}) \quad (2.10)$$

Où :

$g_1$  : fraction du constituant majoritaire 1

$g_2$  : fraction du constituant majoritaire 2

Dans ce travail, Benyoussef et ses collaborateurs (Benyoussef et al, 2013), ont démontré que l'hypothèse de considérer l'huile essentielle comme étant un pseudo-composé est à prendre avec beaucoup de précaution. De ce fait, ils ont développé un modèle qui tient compte de la composition de l'huile essentielle.

### 2.2.4 Modèle empirique de Babu et Singh (2009)

Babu et Singh (Babu et al, 2009), ont simulé l'hydrodistillation de feuilles fraîches et séchées par un modèle empirique inspiré par Naik et ses collaborateurs (Naik et al, 1989) qui ont traité l'extraction de parfums avec du CO<sub>2</sub> liquide.

Dans cette étude, les résultats expérimentaux montraient une variation linéaire du rendement en fonction du temps pour les temps courts et une stabilisation de celui-ci vers un palier pour les temps « infinis ».

L'allure de la cinétique rappelait l'allure de l'isotherme de Langmuir, ce qui poussa Naik à choisir une équation similaire pour modéliser le rendement d'extraction à la différence qu'elle ne s'exprime pas en fonction de concentrations d'équilibre dans chaque phase mais du temps d'extraction

#### Hypothèse du modèle :

- les résistances au transfert de matière étaient négligeables durant la distillation à cause de sa nature fragile et de l'équilibre instantané entre phases (solide, liquide, vapeur) au moment de l'ébullition. Cependant, la fine couche visqueuse contribue à la résistance au transfert de matière.
- Pour de longues périodes de distillation, le rendement demeurait constant.
- Durant les moments initiaux (courts), l'augmentation du rendement en huile est linéaire.

$$q = \frac{q_{\infty} t}{b + t} \quad (2.11)$$

Où  $q$  représente le rendement en huile essentielle et  $b$  est un paramètre de l'équation n'ayant pas de relation directe avec le mécanisme d'extraction ni les propriétés de transport du solvant, car l'équation est un modèle empirique basé sur une simple observation de la cinétique de rendement et non sur l'intégration du bilan de matière différentiel.

L'étude de Belbessai et al (Belbessai et al, 2016) a démontré que ce modèle empirique de Babu n'était rien d'autre qu'un modèle du second ordre décrivant la cinétique d'adsorption en posant

$$\frac{1}{b} = q_{\infty} k_2 \quad (2.12)$$

En effet le modèle du pseudo second ordre sur le fait que la vitesse d'extraction est proportionnelle au carré de la différence de la quantité adsorbée à l'équilibre et la quantité adsorbée à un instant  $t$ .

La loi de vitesse s'écrit :

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (2.13)$$

Où :

- $q_t$  : La quantité de soluté adsorbé au temps  $t$ ;
- $q_e$  : La quantité de soluté adsorbé à l'équilibre;
- $k_2$  : La constante cinétique.

Après intégration de l'équation (2.13) on obtient l'équation :

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad (2.14)$$

Si on divise par l'équation (2.14) par  $q_e k_2$

$$q_t = \frac{q_e t}{\frac{1}{q_e k_2} + t} \quad (2.15)$$

Cette dernière équation a la même forme que celle du modèle de Babu

### 2.2.5 Modèle à deux périodes de temps

Ce modèle mathématique divise le temps d'extraction en deux périodes: la première période où l'évolution du rendement est linéaire en fonction du temps, le soluté est extrais des cellules exogènes, cette étape d'extraction est limitée par la solubilité de l'extrait dans le fluide. Dans la seconde période, la vitesse d'extraction est limitée par la diffusion interne du soluté à partir de la matrice solide.

La cinétique d'extraction est décrite dans tout le domaine de temps par l'équation suivante

$$q(t) = \begin{cases} at[1 - \exp(-b)] & \text{pour } t \leq t^* \\ q_\infty[1 - (1 - G)\exp(-k(t - t^*))] & \text{pour } t > t^* \end{cases} \quad (2.13)$$

Où :

$q_\infty$  : Le rendement d'extraction asymptotique.

$G$  : La fraction initialement extraite de la surface de la matière végétale.

$k$  : La constante cinétique ( $\text{min}^{-1}$ ).

$t^*$  : Le moment où l'huile qui était initialement à la surface de la matière végétale est totalement extraite.

## 2.3 Avantages et inconvénients des modèles de transfert de matière

Le tableau suivant présente les avantages et les inconvénients des quelques modèles proposés dans la littérature (Tableau 2.1)

**Tableau 2.1** : Avantages et inconvénients de quelques modèles de transfert de matière.

Auteurs	Méthode	Année	Plante	Avantages	Inconvénients
Koul	Entraînement à la vapeur d'eau	2004	Citron	Simulation facile (cinétique du premier ordre et un seul paramètre).	Il n'est pas basé sur un bilan de transfert de matière.
Sovova	hydrodistillation	2005	Fleurs de thymes et graines de coriandre	Différenciation entre l'huile superficielle facilement libérable et l'huile interne difficilement accessible.	-Développement mathématique non aisé. -paramètres du modèle non confirmé par l'expérience.
Benyoussef et saïbi	hydrodistillation	2013	Graines de coriandre	-Les paramètres du modèle ont été vérifiés expérimentalement. -Le modèle traduit l'aspect qualitatif et quantitatif.	- Considération de la cinétique du premier ordre pour chaque composant.

## 2.4 Conclusion

Les différents modèles, développés dans ce chapitre, décrivant le transfert de matière lors de l'extraction des huiles essentielle, reposent sur des hypothèses simplificatrices qui ne reflètent pas fidèlement l'expérience. Ces hypothèses peuvent être source d'erreurs conduisant ainsi à des modèles mathématiques imprécis.

## ***Chapitre 3***

***Cinétique d'extraction et  
modélisation de la  
consommation énergétique***



### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous nous proposons de modéliser la consommation énergétique de deux procédés, l'hydrodiffusion assistée par micro-ondes et l'entraînement à la vapeur d'eau assisté par micro-ondes qui sera comparée au procédé classique analogue. Le but de cette étude est d'une part de voir les possibilités d'optimisation de la quantité d'énergie consommée dans les procédés classiques et d'autre part de mieux apprécier les avantages de l'intensification par l'utilisation des micro-ondes dans l'économie d'énergie.

### 3.2 La lavande

La lavande, est une plante médicinale utilisée dès l'antiquité par les Egyptiens, les Grecs et les Romains qui s'en servaient comme parfum, pour les bains et l'entretien du linge. D'un point de vue morphologique, la lavande est un sous-arbrisseau appartenant à la famille des Lamiacées ou Labiées, du genre *lavandula*, de 30 à 80 cm de hauteur, à feuilles opposées et de fleurs le plus souvent de couleur pourpres à bleu violacées disposées en épis (Hardman, 2002).

Dans la nature, il existe plusieurs espèces et variétés de lavandes, dont les deux principales sont la lavande vraie (*Lavandula angustifolia*) et le lavandin (*Lavandula intermedia*) (Chograni et al, 2012).

L'huile essentielle de fleur de lavande est emmagasinée dans des structures cellulaires spécifiques appelées « glandes sécrétrices ». Ces cellules sécrétrices sont réparties sur l'ensemble de la plante. Rarement sur les faces supérieures des feuilles et des tiges, elles sont un peu plus nombreuses sur le dessous des feuilles, mais elles sont en abondent surtout sur le calice des fleurs.

Le moyen le plus approprié pour extraire l'huile essentielle de lavande ou du lavandin est la distillation à la vapeur d'eau que l'on réalise dans des alambics (Hardman, 2002).

### 3.3 Cinétique d'extraction des huiles essentielles

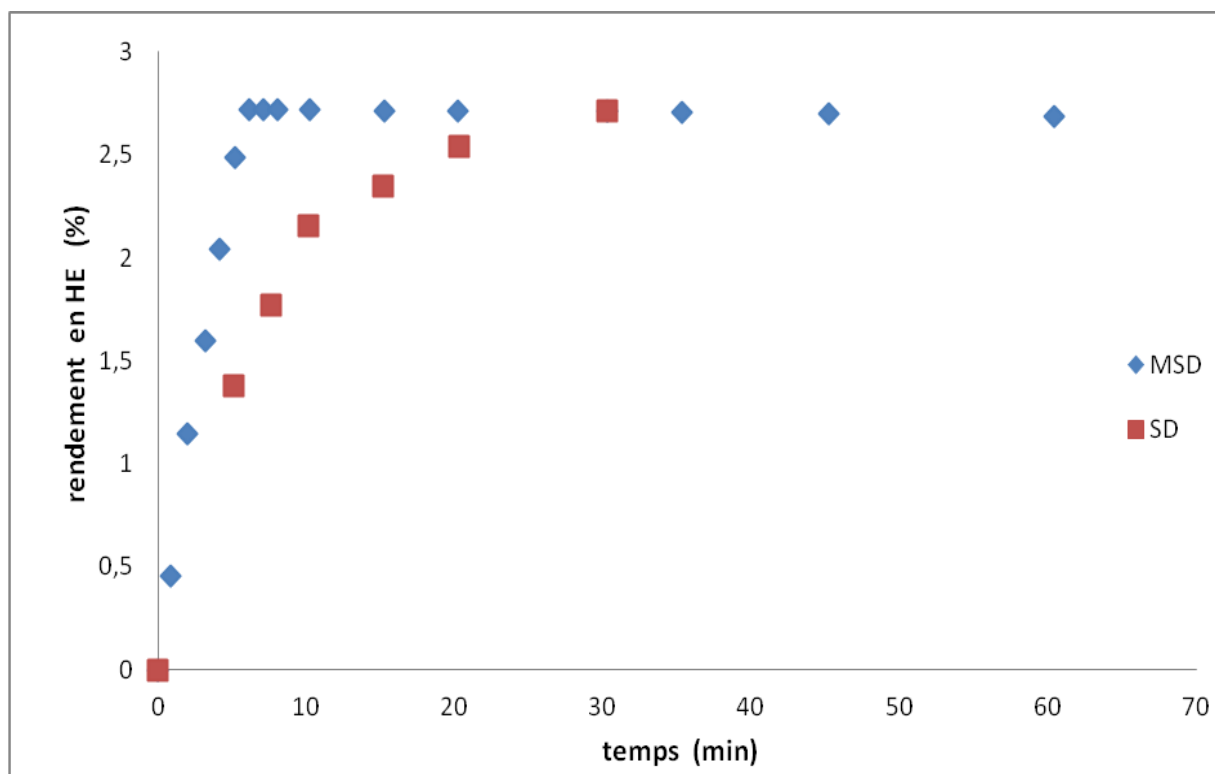
#### ❖ Sahraoui et al (2012)

Sahraoui et ses collaborateurs (Sahraoui et al, 2012), ont mené l'extraction des huiles essentielles de la lavande en comparant entre l'extraction à l'entraînement à la vapeur d'eau classique et assistée par micro-ondes.

Au cours des expériences, le temps, la température, la pression et la puissance ont été contrôlés. Un générateur de vapeur électrique et un condenseur placé à l'extérieur d'une zone hyperfréquence sont connectés à une cartouche contenant une plante aromatique via des tubes de liaison Pyrex. La cartouche contenant 20 g de fleurs de lavande sèches est soumise à un chauffage par micro-ondes dès que la vapeur commence à traverser le matériau aromatique.

Une puissance d'irradiation des micro-ondes de 200W pour 20 g de fleurs de lavande était la densité optimale de puissance des micro-ondes car cette puissance permet en moins de 10 minutes d'extraire complètement l'huile essentielle et d'éviter la perte de composés volatils.

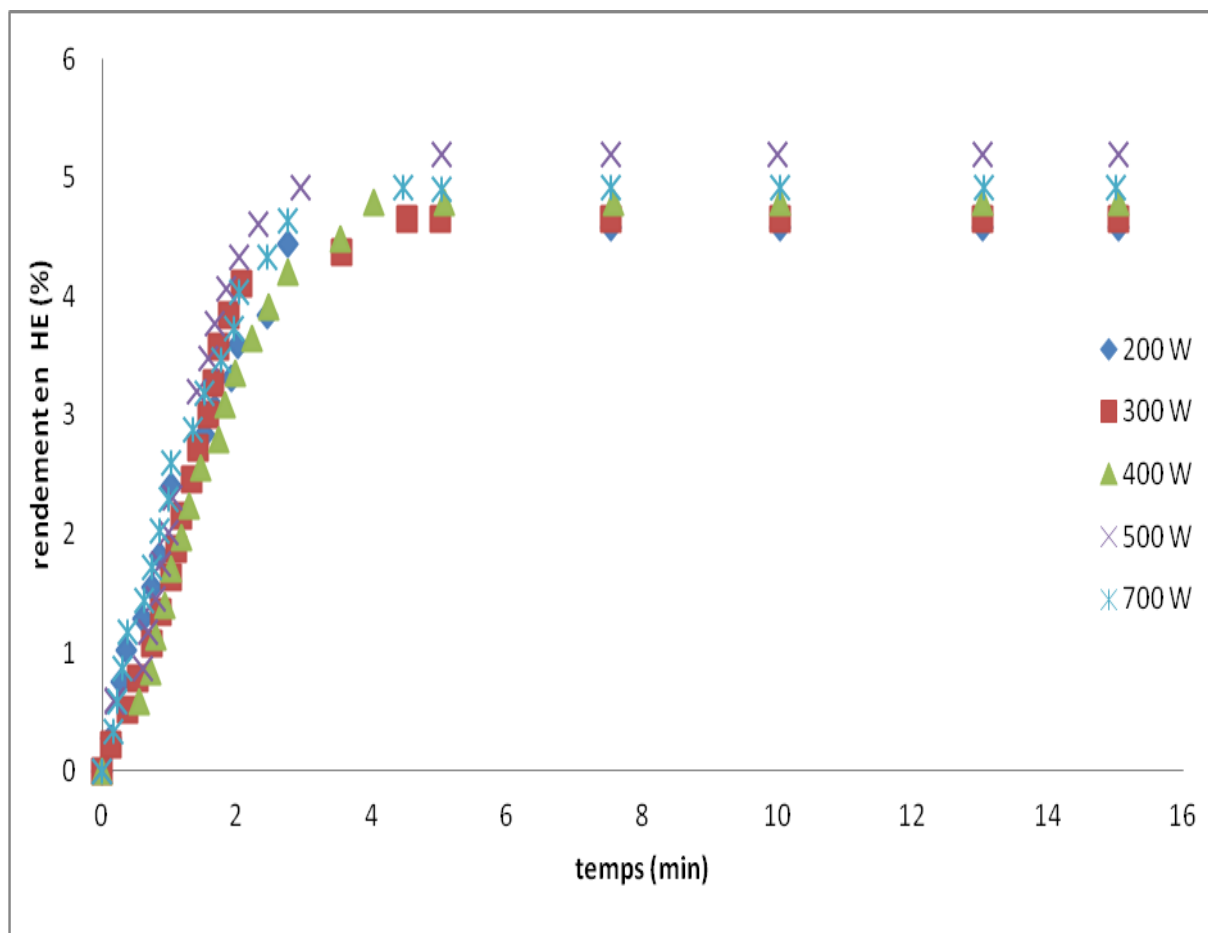
Pour faciliter la comparaison, la même verrerie et les mêmes conditions de fonctionnement ont été utilisées pour la SD classique. Les résultats expérimentaux sont représentés dans la figure ci-dessous :



**Figure 3. 1** : Cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par MSD et SD (Sahraoui et al, 2012)

Les rendements obtenus par les deux procédés sont du même ordre de grandeur, la seule différence observée est la durée d'extraction. Un temps d'extraction de 6 min pour les fleurs de lavande avec MSD fournit des rendements comparables à ceux obtenus après 30 min par SD. Les valeurs obtenues pour le rendement en huile essentielle de lavande sont de  $2,7 \pm 0,1\%$  pour les deux procédés.

Sahraoui et ses collaborateurs (Sahraoui et al, 2012) se sont aussi intéressés à l'étude de l'influence de la puissance de chauffage sur la cinétique d'extraction d'huile essentielle de la lavande par entraînement à la vapeur d'eau assistée par micro-ondes. Ces auteurs ont testé cinq puissances (200, 300, 400, 500 et 700 W) à un même débit de 8 g/min. Les points expérimentaux sont représentés dans la figure suivante :



**Figure 3. 2 :** Cinétiques d'extraction de l'huile essentielle de lavande par entraînement à la vapeur d'eau (Sahraoui et al, 2012)

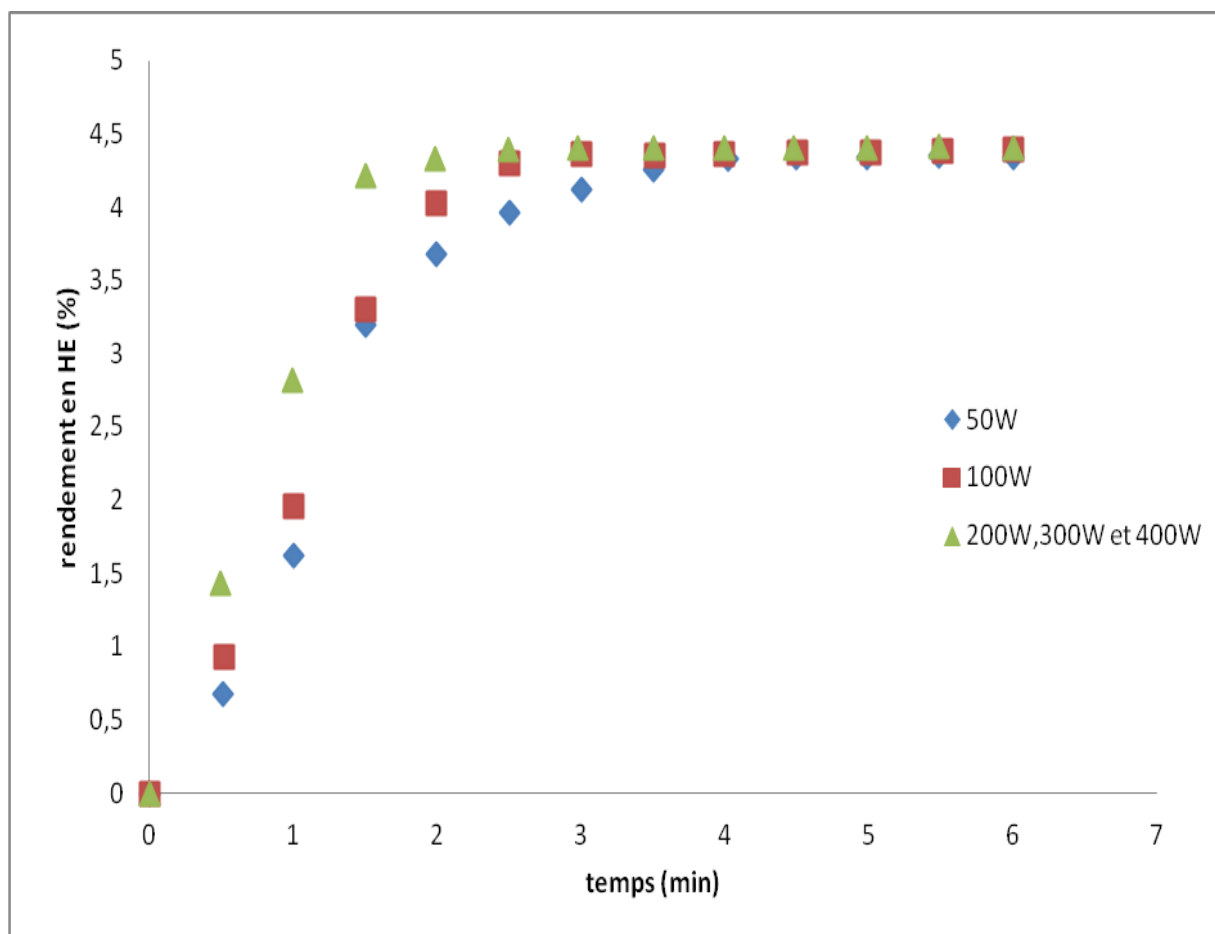
Les rendements obtenus par les deux procédés sont du même ordre de grandeur, la seule différence observée est la durée d'extraction. Un temps d'extraction de 6 min pour les fleurs de lavande avec MSD fournit des rendements comparables à ceux obtenus après 30 min par SD. Les valeurs obtenues pour le rendement en huile essentielle de lavande sont de  $2,7 \pm 0,1\%$  pour les deux procédés.

Sahraoui et ses collaborateurs (Sahraoui et al, 2012) se sont aussi intéressés à l'étude de l'influence de la puissance de chauffage sur la cinétique d'extraction d'huile essentielle de la lavande par entraînement à la vapeur d'eau assistée par micro-ondes. Ces auteurs ont testés cinq puissances (200, 300, 400, 500 et 700 W) à un même débit de 8 g/min. Les points expérimentaux sont représentés dans la figure ci-dessous :

#### ❖ Farhat et al (2009)

Farhat et ses collaborateurs (Farhat et al, 2009) ont étudié l'extraction d'huile essentielle de lavande à partir de 30 g de matières premières par deux types de procédés, le premier est l'hydrodiffusion classique, il a été effectué à plusieurs débits et le second, est la hydrodiffusion assistée par micro-ondes, effectuée pour diverses puissances de chauffage du four à micro-ondes.

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés aux cinétiques d'extractions d'huile essentielle par MSDF conduit pour plusieurs puissances à un même débit de vapeur de 25 g/mn. Les résultats expérimentaux sont représentés dans la figure (3.3)



**Figure 3. 3 :** Cinétiques d'extraction de l'huile essentielle de lavande par hydrodiffusion (Farhat et al, 2009)

D'après les résultats obtenus par ces auteurs (figure 3.3) nous pouvons remarquer qu'en augmentant la puissance micro-ondes, la cinétique d'extraction devient plus rapide. Cependant cette démarche peut provoquer l'altération de la qualité de l'huile essentielle obtenue.

### 3.4 Modélisation des données cinétiques

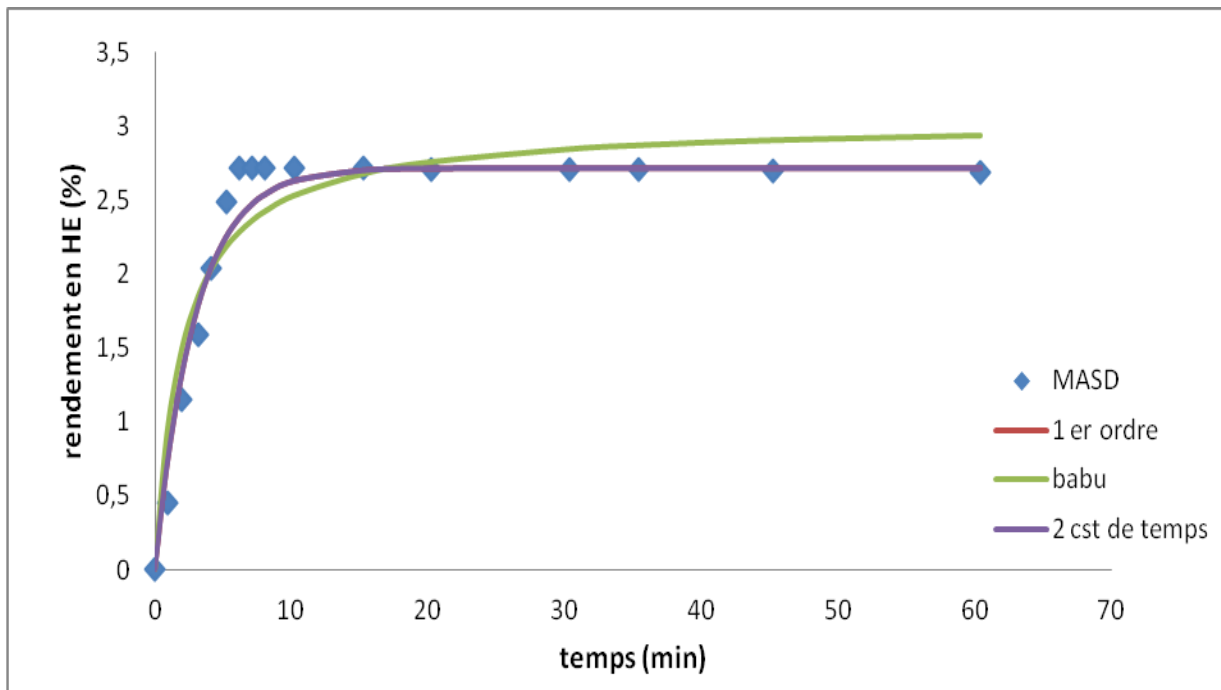
Modéliser la consommation énergétique nécessite forcément la modélisation du transfert de matière afin de simuler les cinétiques d'extraction. Dans le chapitre précédent, nous avons rapporté plusieurs modèles de transfert de matière se basant différentes approches.

Ces modèles nous ont permis de simuler les cinétiques d'extraction d'huile essentielle de lavande obtenues par différent procédé entraînement à la vapeur d'eau et entraînement à la vapeur d'eau assisté par micro-ondes (Sahraoui et al, 2012) (Sahraoui et al, 2012), et hydrodiffusion assisté par micro-ondes (Farhat et al, 2009).

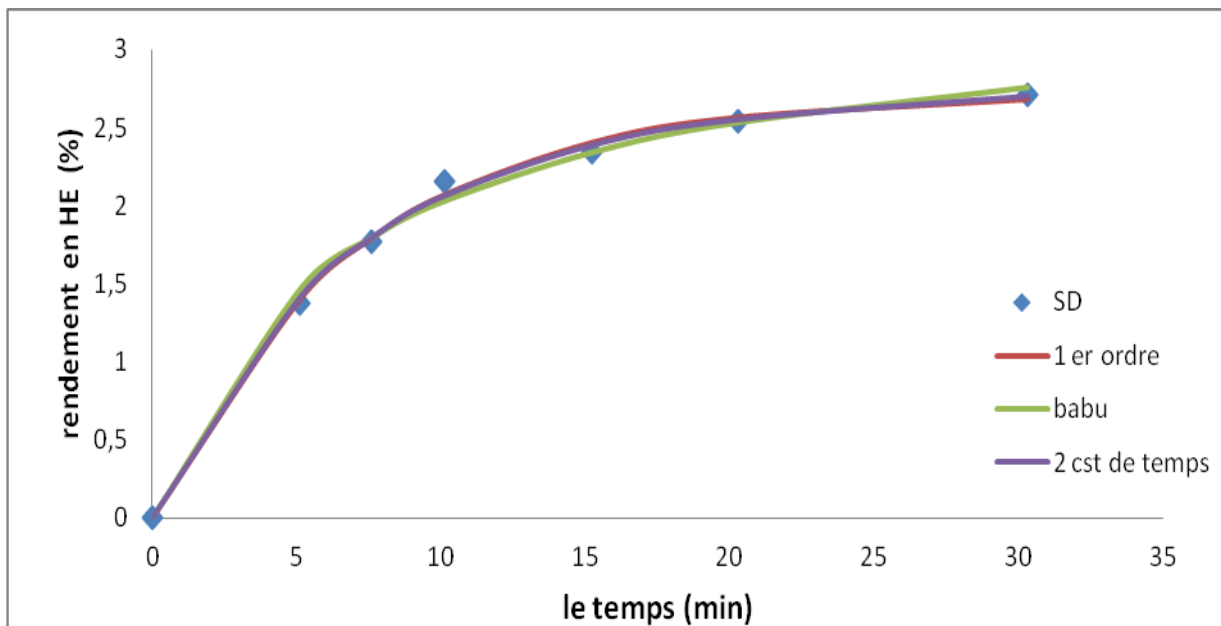
❖ **Sahraoui et al (2012)**

Sahraoui et ses collaborateurs (Sahraoui et al, 2012), ont étudié l'extraction des huiles essentielles de la lavande par deux techniques l'entraînement à la vapeur d'eau classique et assisté par micro-ondes.

Les points expérimentaux et les courbes simulées pour chaque technique sont représentés sur les figures suivantes :



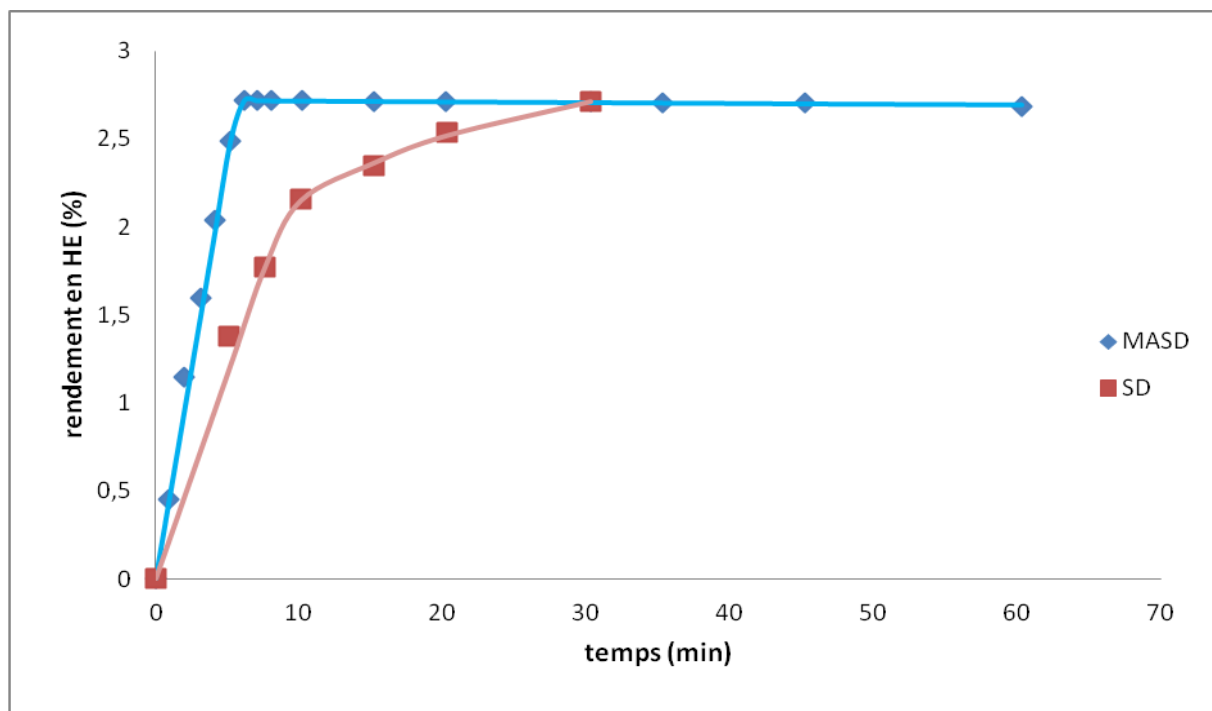
**Figure 3. 4 :** Simulation de la cinétique d'extraction pour la MASD (Sahraoui et al, 2012)



**Figure 3. 5 :** Simulation de la cinétique d'extraction obtenue par la SD (Sahraoui et al, 2012)

**Tableau 3. 1** : Paramètres des modèles simulés pour la cinétique d'extraction de HE de lavande par SD et MASD (Sahraoui et al, 2012)

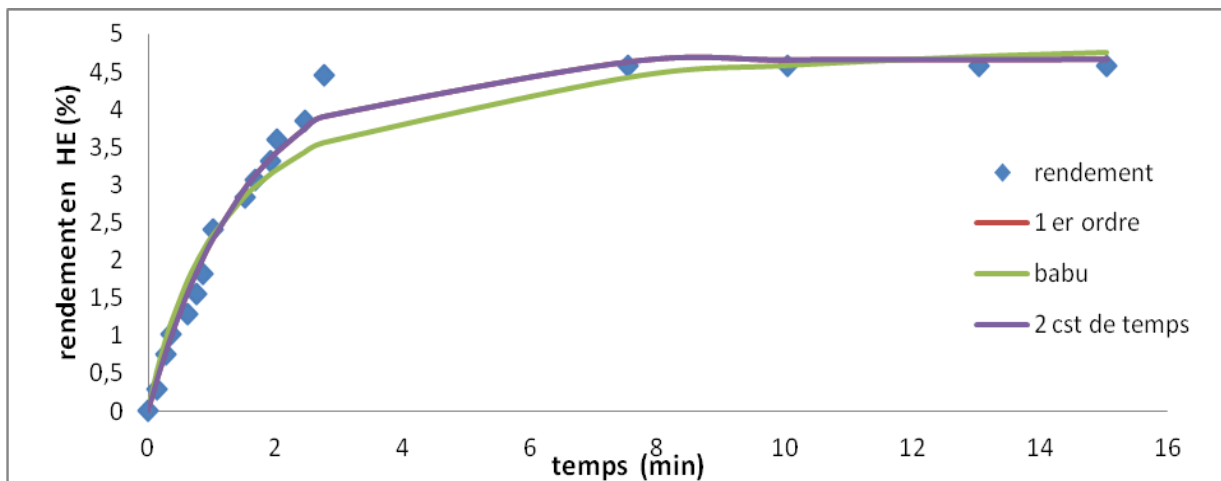
Modèle du pseudo premier ordre	Technique	Paramètres du modèle				
		$q_{\infty}$ (%)	$k$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$R^2$		
	SD	2,72	0,141	0,997		
	MASD	2,714	0,338	0,966		
Modèle de Babu	Technique	Paramètres du modèle				
		$q_{\infty}$ (%)	$b$	$R^2$		
	SD	3,362	6,631	0,9949		
	MASD	3,04	2,032	0,9104		
Modèle à deux constantes de temps	Technique	Paramètres du modèle				
		$q_{\infty}$ (%)	$f$	$k_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$k_2$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$R^2$
	SD	3,621	0,299	0,006	0,153	0,997
	MASD	2,714	0,970	0,338	0,338	0,966

**Figure 3. 6** : Simulation des cinétiques d'extraction pour la MASD et SD (Sahraoui et al, 2012)

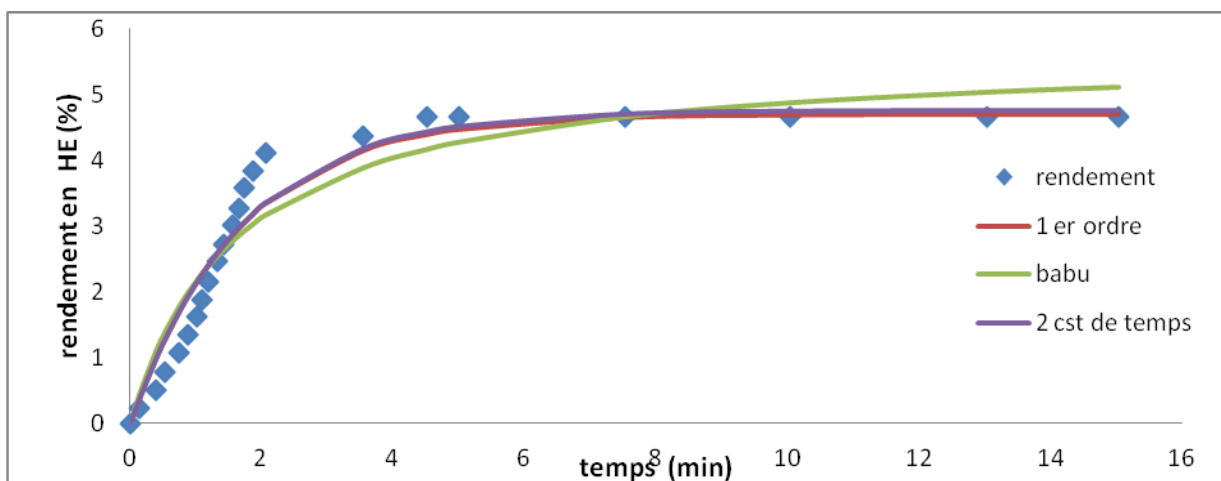
**Tableau 3. 2 :** Paramètres du modèle simulé pour les cinétiques d'extraction de HE de lavande par SD et MASD (Sahraoui et al, 2012)

Modèle à deux périodes de temps	Technique	$t^*$ (min)	Paramètres du modèle						
			Partie 1 : $t \leq t^*$			Partie 2 : $t > t^*$			
			A	b	$R^2$	$q_{\infty}$ (%)	G	k ( $\text{min}^{-1}$ )	$R^2$
MASD	6	0,510	2,755	0,983	2,422	1,123	0,001	0,865	
SD	10	0,259	2,295	0,972	2,941	0,731	0,062	0,996	

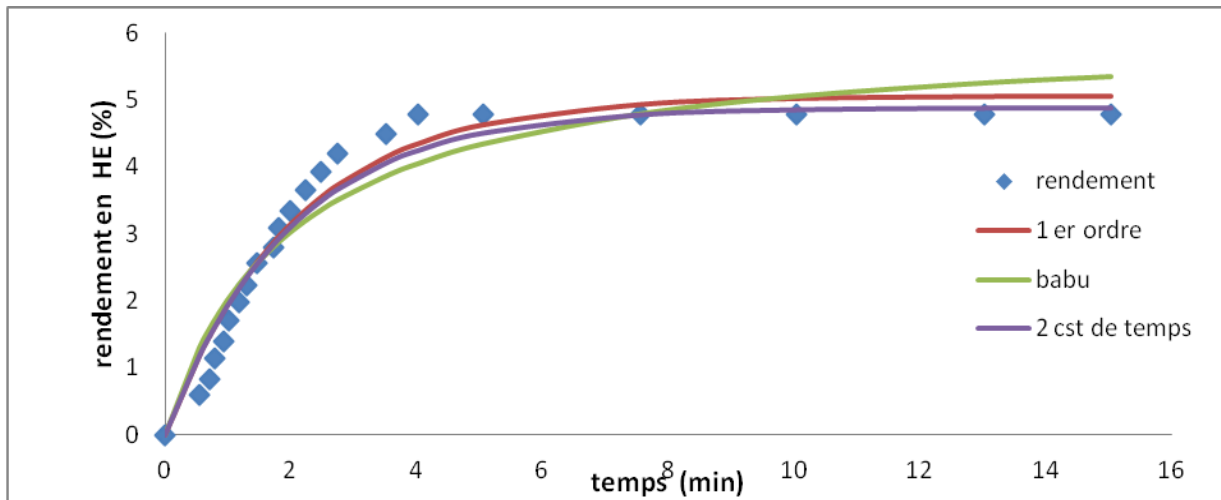
Les résultats de la simulations par les différent modèles pour chaque puissance de chauffe sont représentés sur les figures suivantes :



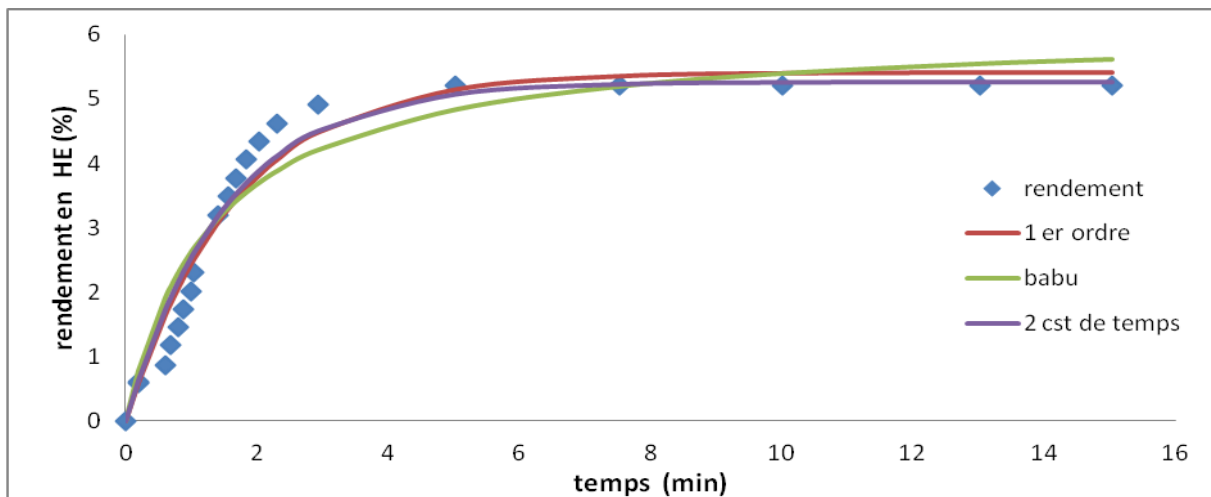
**Figure 3. 7 :** Simulation de la cinétique d'extraction obtenue pour une puissance de chauffe égale à 200 W (Sahraoui et al, 2012)



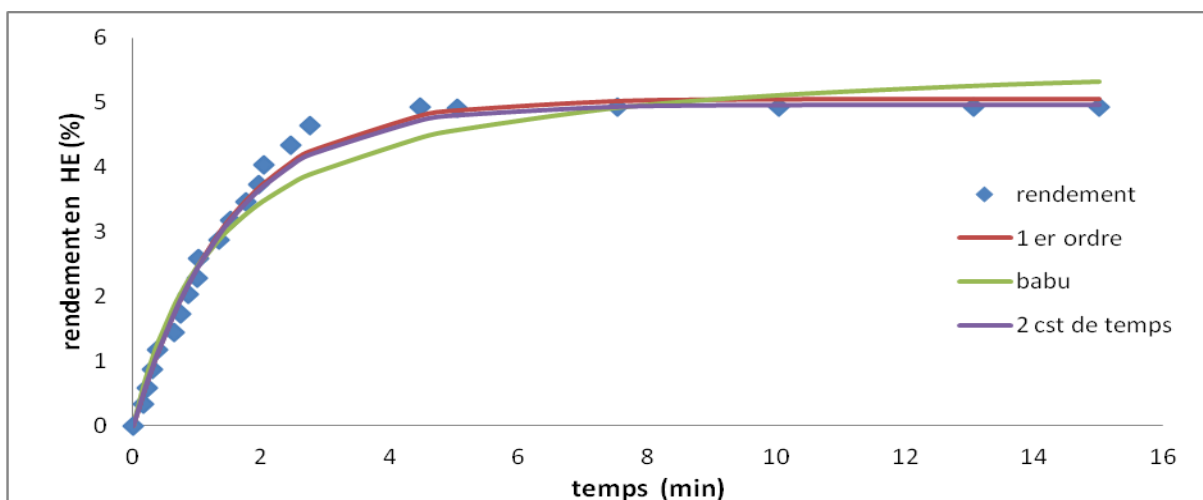
**Figure 3. 8 :** Simulation de la cinétique d'extraction obtenue pour une puissance de chauffe égale à 300 W (Sahraoui et al, 2012)



**Figure 3. 9 :** Simulation de la cinétique d'extraction obtenue pour une puissance de chauffe égale à 400 W (Sahraoui et al, 2012)



**Figure 3. 10 :** Simulation de la cinétique d'extraction obtenue pour une puissance de chauffe égale à 500 W (Sahraoui et al, 2012)



**Figure 3. 11 :** Simulation de la cinétique d'extraction obtenue pour une puissance de chauffe égale à 700 W (Sahraoui et al, 2012)

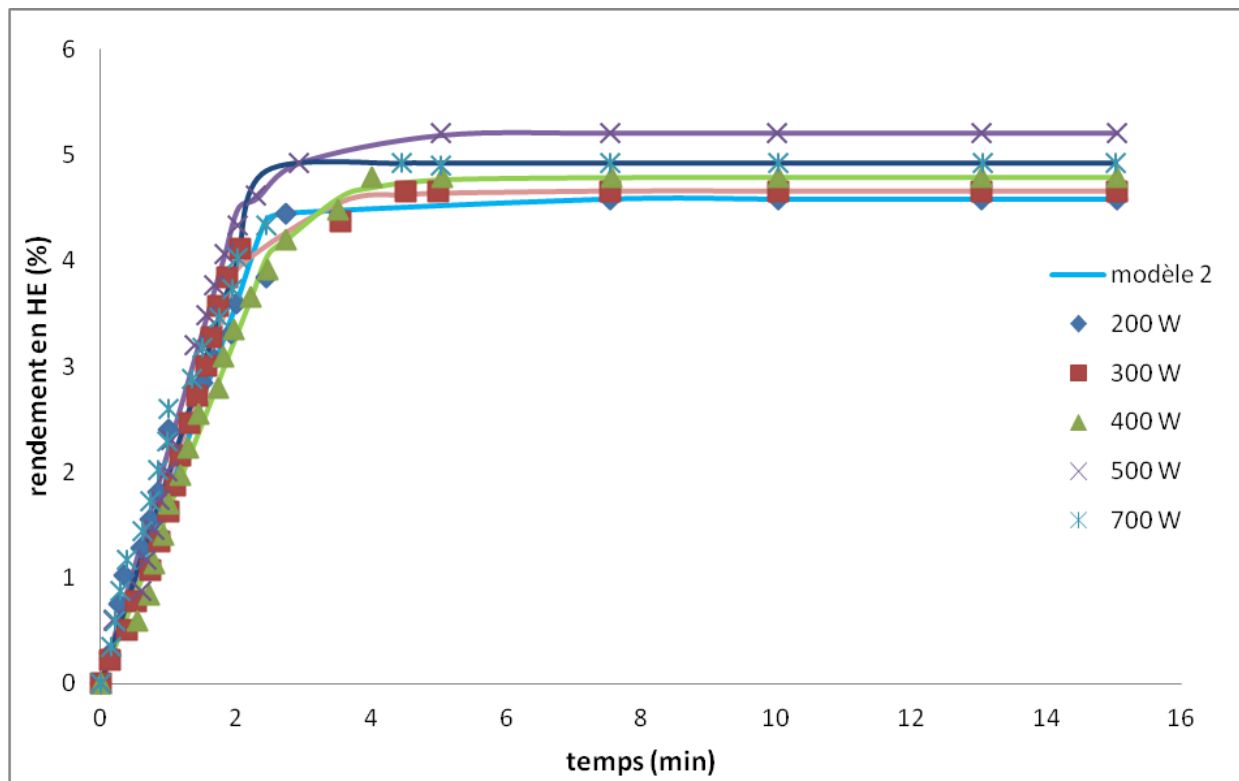


**Tableau 3.3** : paramètres des modèles simulé pour les cinétiques d'extraction de HE de lavande par entrainement à la vapeur d'eau assistée par micro-ondes (Sahraoui et al ,2012)

	Puissance de chauffe (w)	Paramètres du modèle				
		$q_{\infty}$ (%)	$k$ (min <sup>-1</sup> )	$R^2$		
Modèle du pseudo premier ordre	200	4,666	0,660	0,987		
	300	4,705	0,605	0,943		
	400	5,050	0,487	0,953		
	500	5,407	0,600	0,954		
	700	5,052	0,667	0,989		
	Puissance de chauffe (w)	Paramètres du modèle				
		$q_{\infty}$ (%)	$b$	$R^2$		
Modèle de Babu	200	5,140	1,225	0,959		
	300	5,657	1,619	0,907		
	400	6,051	1,994	0,909		
	500	6,120	1,325	0,911		
	700	5,803	1,35	0,960		
	Puissance de chauffe (w)	Paramètres du modèle				
		$q_{\infty}$ (%)	$f$	$k_1$ (min <sup>-1</sup> )	$k_2$ (min <sup>-1</sup> )	$R^2$
Modèle à deux constantes de temps	200	4,666	0,822	0,660	0,661	0,987
	300	4,759	0,983	0,594	0,595	0,944
	400	4,895	0,999	0,506	2e-014	0,951
	500	5,259	0,999	0,659	0,6307	0,951
	700	4,970	0,781	0,678	0,6785	0,988

**Tableau 3. 4 :** Paramètres du modèle simulé pour les cinétiques d'extraction de HE de lavande par MASD (Sahraoui et al, 2012)

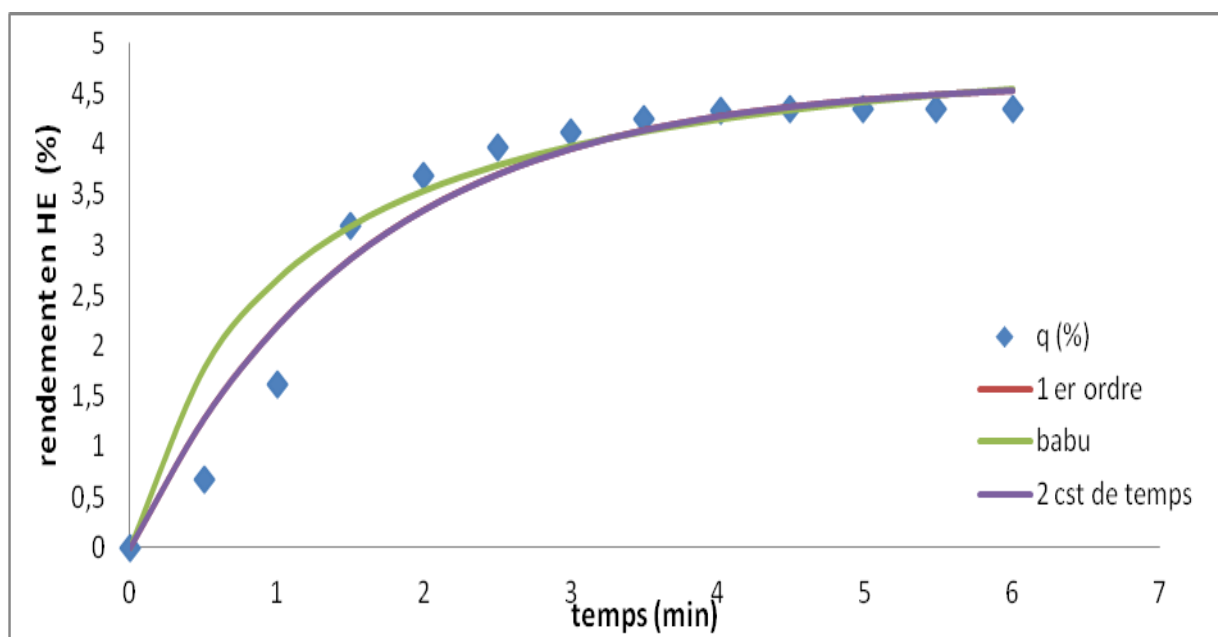
Modèle à deux périodes de temps	Puissance de chauffe (W)	$t^*$ (min)	Paramètres du modèle						
			Partie 1 : $t \leq t^*$			Partie 2 : $t > t^*$			
			A	b	$R^2$	$q_{\infty}$ (%)	G	k ( $\text{min}^{-1}$ )	$R^2$
200	2,5	2,3	1,51	0,949	4,590	0,971	4,73	0,999	
300	2	2,666	1,268	0,973	4,656	0,882	1,112	0,9624	
400	2,5	1,952	1,834	0,981	4,790	0,818	1,436	0,988	
500	2	2,388	2,594	0,977	5,205	0,833	1,238	0,9994	
700	2,75	2,306	1,962	0,9426	4,921	0,942	19,57	0,9975	



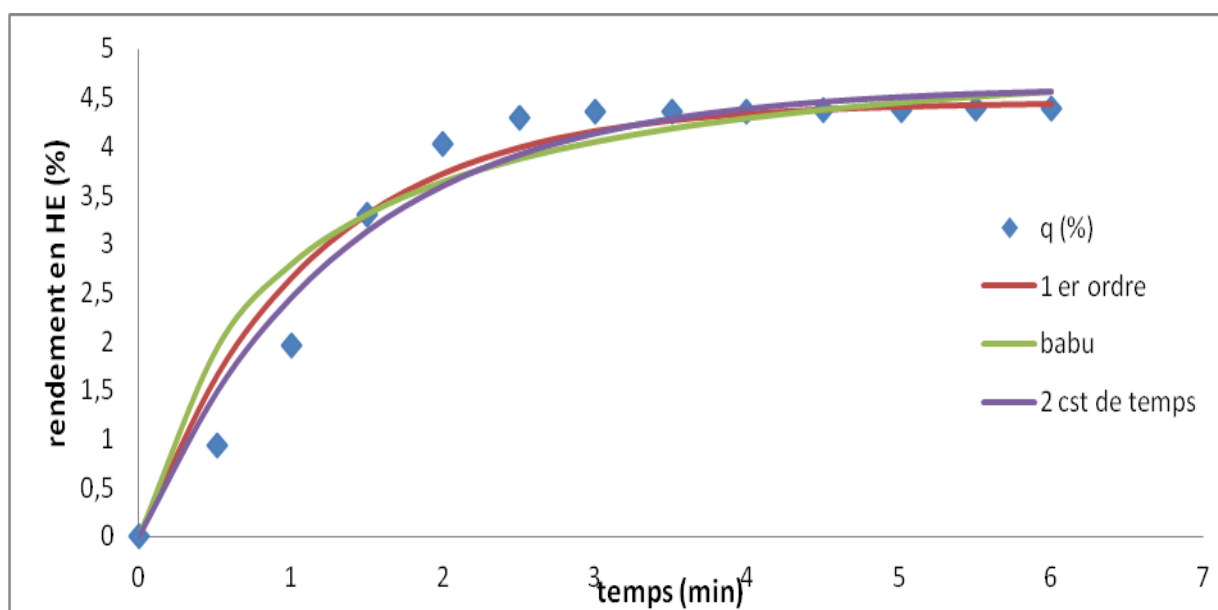
**Figure 3. 12 :** Simulation de la cinétique d'extraction d'huile essentielle de lavande par MASD (sahraoui et al ,2012)

## ❖ Farhat et al (2009)

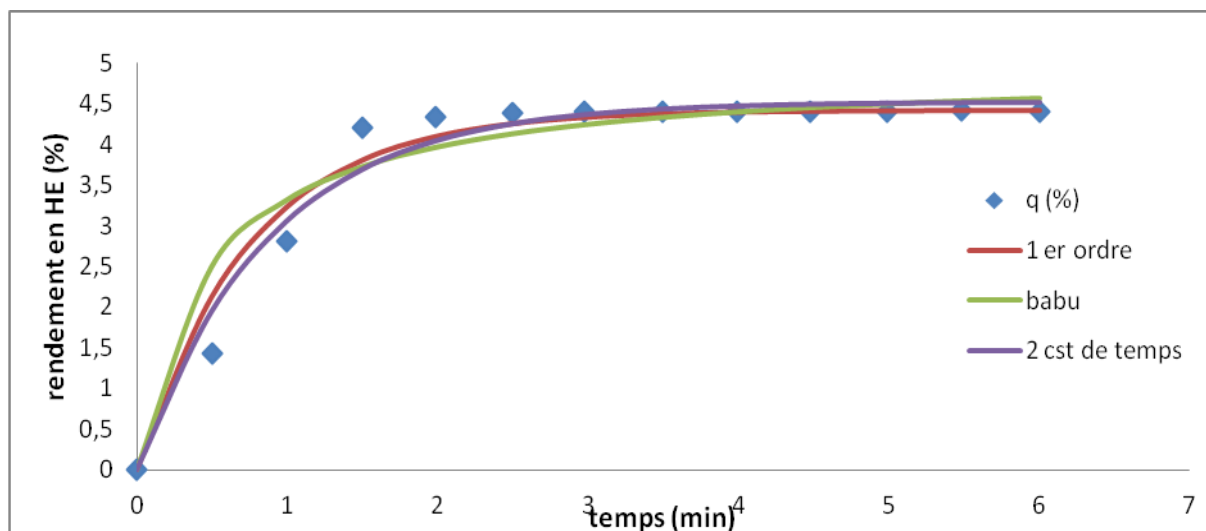
Farhat et ses collaborateurs (Farhat et al, 2009) ont conduit la vapodiffusion des fleurs de lavande assistée par micro-ondes pour différentes puissances à un même débit de vapeur de 25 g/mn pour trouver la puissance optimale. Les cinétiques obtenues ont été simulées par les différents modèles. Les résultats de la simulation sont représentés sur les figures suivantes :



**Figure 3. 13 :** Simulation de la cinétique d'extraction obtenue pour une puissance de chauffe égale à 50 W (Farhat et al, 2009)



**Figure 3. 14 :** Simulation de la cinétique d'extraction obtenue pour une puissance de chauffe égale à 100 W (Farhat et al, 2009)



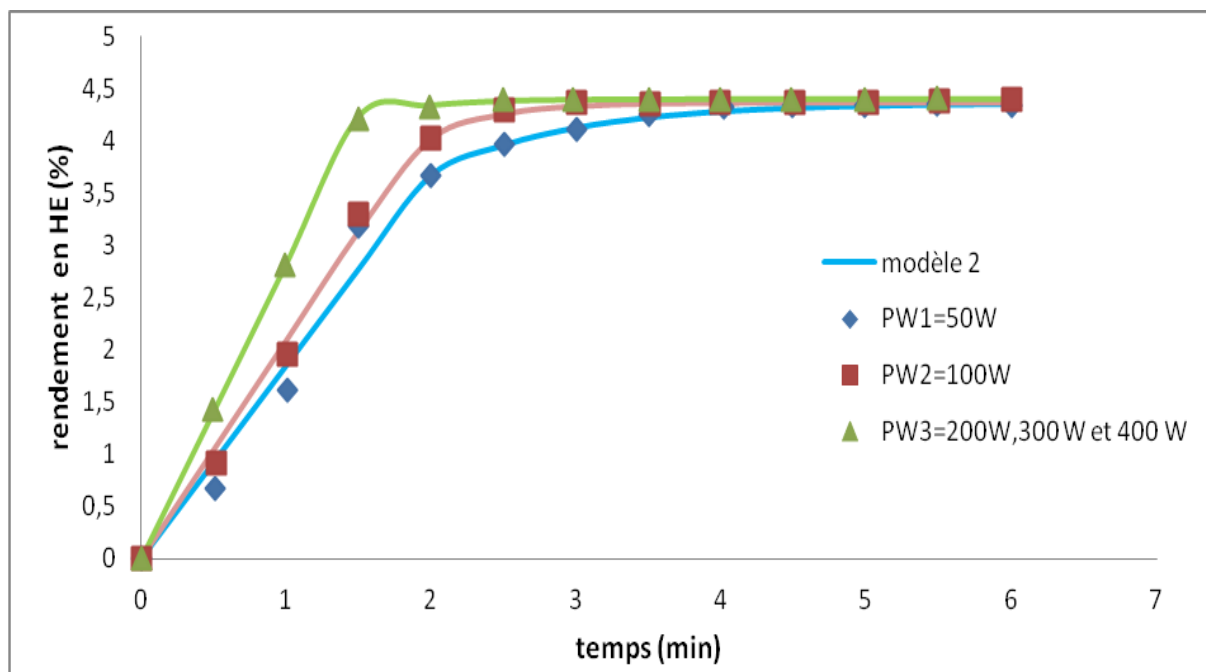
**Figure 3. 15 :** Simulation de la cinétique d'extraction obtenue pour une puissance de chauffe égale à 200, 300 et 400 W (Farhat et al, 2009)

**Tableau 3. 5 :** paramètres des modèles simulé pour les cinétiques d'extraction de HE de lavande par hydrodiffusion assistée par micro-ondes (Farhat et al ,2009)

Modèle du pseudo premier ordre	Puissance de chauffe (w)	Paramètres du modèle				
		$q_{\infty}$ (%)	$k$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$R^2$		
	50	4,633	0,644	0,960		
	100	4,451	0,901	0,990		
	200, 300 et 400	4,427	1,315	0,992		
Modèle de Babu	Puissance de chauffe (w)	Paramètres du modèle				
		$q_{\infty}$ (%)	B	$R^2$		
	50	5,307	0,995	0,9861		
	100	5,223	0,874	0,9178		
	200, 300 et 400	4,942	0,488	0,9218		
Modèle à deux constantes de temps	Puissance de chauffe (w)	Paramètres du modèle				
		$q_{\infty}$ (%)	$f$	$k_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$k_2$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$R^2$
	50	4,633	0,177	0,643	0,643	0,960
	100	4,615	0,451	0,756	0,756	0,961
	200, 300 et 400	4,519	0,392	1,131	1,131	0,969

**Tableau 3. 6 :** Paramètres du modèle simulé pour les cinétiques d'extraction de HE de lavande par MASD (farhat et al, 2009)

Modèle à deux périodes de temps	Puissance de chauffe (W)	$t^*$ (min)	Paramètres du modèle						
			Partie 1 : $t \leq t^*$			Partie 2 : $t > t^*$			
			a	b	$R^2$	$q_{\infty}$ (%)	G	k ( $\text{min}^{-1}$ )	$R^2$
50	1,5	2,187	1,885	0,948	4,372	0,729	1,071	0,998	
100	1,5	2,424	2	0,987	4,375	0,753	2,266	0,998	
200	1,5	3,153	2,27	0,999	4,404	0,956	2,355	0,992	

**Figure 3. 16 :** simulation de la cinétique d'extraction d'huile essentielle de lavande par MSDF (farhat et al, 2009)

La simulation des travaux de Farhat et ses collaborateurs (Farhat et al, 2009) et Sahraoui et ses collaborateurs (Sahraoui et al, 2012) (Sahraoui et al, 2012) a montré que le modèle à deux périodes de temps est celui qui décrit le mieux le mécanisme de transfert de matière qui a lieu lors du MASD.

### 3.5 Modélisation de la consommation énergétique

Le modèle à deux périodes de temps ayant présenté une bonne simulation des points expérimentaux aussi bien lors de l'extraction de l'huile essentielle de lavande par l'entraînement par la vapeur d'eau classique et assisté par micro-ondes, il sera donc utilisé pour la modélisation de la consommation énergétique. Nous rappelons que l'équation du modèle est sous la forme suivante :

$$q(t) = \begin{cases} at[1 - \exp(-b)] & \text{pour } t \leq t^* \\ q_{\infty}[1 - (1 - G) \exp(-k(t - t^*))] & \text{pour } t > t^* \end{cases} \quad (3.1)$$

Pour une meilleure maîtrise de la consommation énergétique lors de l'extraction d'huile essentielle par entraînement à la vapeur d'eau, nous avons pensé à représenter l'évolution de l'énergie consommée avec la quantité d'huile essentielle extraite. Sachant que l'énergie consommée est le produit de puissance utilisée et de la durée d'extraction (3.2) et partant du modèle à deux périodes de temps (3.1) nous avons pu exprimer cette consommation (3.5).

$$E = p \times t \quad (3.2)$$

$$t = \begin{cases} \frac{q}{a[1 - \exp(-b)]} & \text{pour } t \leq t^* \\ \frac{-1}{k} \ln \left[ \frac{1}{1 - G} \times \left( 1 - \frac{q}{q_{\infty}} \right) \right] + t^* & \text{pour } t > t^* \end{cases} \quad (3.3)$$

Nous posons :  $a[1 - \exp(-b)] = q_{\infty} \times d$

L'équation devient alors :

$$t = \begin{cases} \frac{q}{q_{\infty} \times d} & \text{pour } t \leq t^* \\ \frac{-1}{k} \ln \left[ \frac{1}{1 - G} \times \left( 1 - \frac{q}{q_{\infty}} \right) \right] + t^* & \text{pour } t > t^* \end{cases} \quad (3.4)$$

En remplaçant le temps par son expression (3.4) dans l'équation (3.2) nous obtenons une équation sous la forme suivante :

$$E = \begin{cases} P \times \frac{q}{q_{\infty} \times d} & \text{pour } t \leq t^* \\ P \times \left[ \frac{-1}{k} \ln \left( \frac{1}{1-G} \times \left( 1 - \frac{q}{q_{\infty}} \right) \right) \right] + t^* & \text{pour } t > t^* \end{cases} \quad (3.5)$$

Cette dernière équation, représente l'énergie consommée en fonction du rendement à chaque instant par rapport au rendement final tout au long de l'extraction. Dans le cas des procédés assistés par microondes

Où

P : représente la puissance consommée.

#### ❖ Sahraoui et al (2012)

L'étude d'impact menée par ces auteurs a montré que les besoins en énergie pour effectuer les distillations sont de 0,3 kWh / g d'HE pour SD et de 0,05 kWh / g d'HE pour MSD. Cette consommation d'énergie a été déterminée avec un wattmètre placé à l'entrée d'alimentation du four de micro-ondes et du générateur de vapeur. Le débit de vapeur a été fixé à 8 g/min et la puissance de chauffe du four micro-ondes été de 200 W.

Dans le cas du procédé assisté par micro-ondes nous supposons que

$$E_{MASD} = E_f + E_{g,v} \quad (3.6)$$

Et

$$E(kJ) = 3600 \times y_{\infty} \times E_{elec} \times M_{mv} \quad (3.7)$$

$E_f$  : l'énergie consommée par le four micro-ondes ;

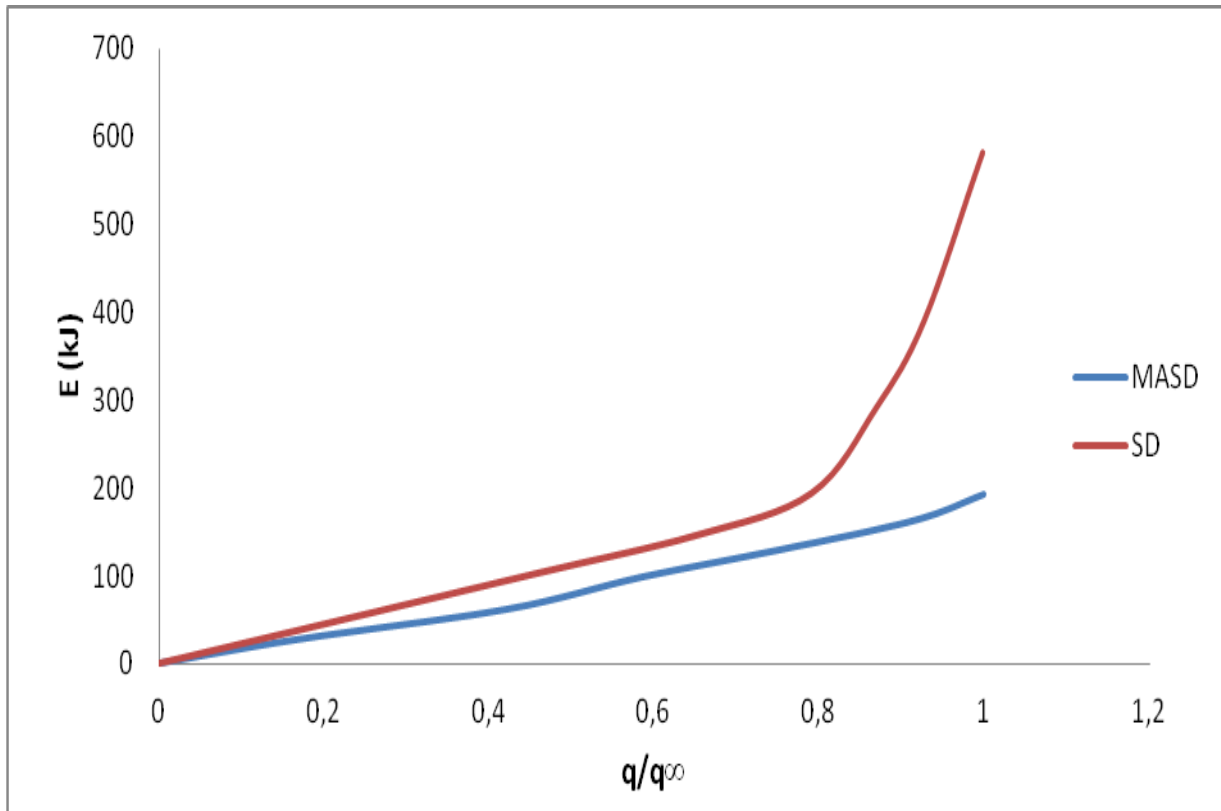
$E_{g,v}$  : l'énergie consommée par le générateur de vapeur.

Pour le procédé classique, puisqu'il n'y a que le générateur de vapeur qui consomme de l'énergie, alors

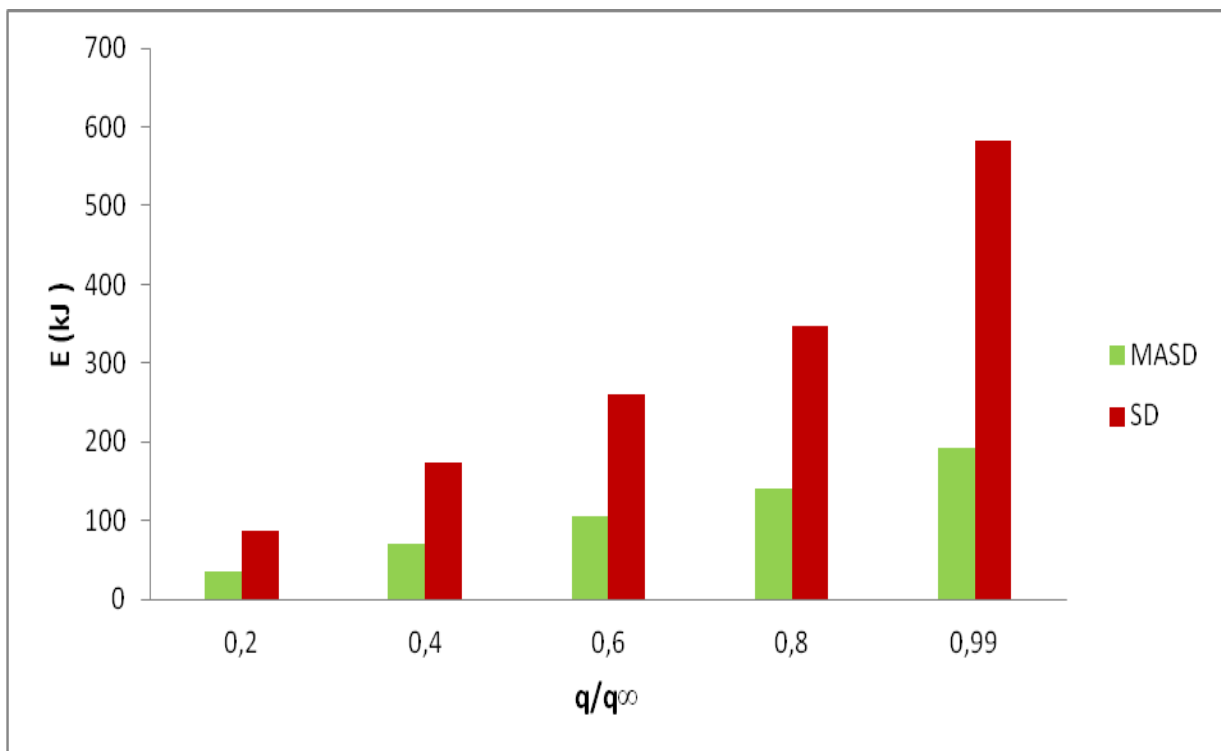
$$E_{SD}(kJ) = P_{g,v}(kW)t_{\infty}(s) \quad (3.8)$$

Nous trouvant alors que pour un débit de 8 g/min la puissance du générateur de vapeur est égale 0,32 kW

À partir des équations (3.5) et (3.6) nous avons pu accéder à la consommation instantanée d'énergie dans les deux techniques d'extraction. La simulation de cette énergie consommée pour différents rendements est présentée sur la figure ci-dessous :



**Figure 3. 17 :** Simulation de la consommation énergétique en fonction du rendement de l'extraction (sahraoui et al ,2012)



**Figure 3. 18 :** Comparaison de la consommation énergétique pour les différents rendements en HE (sahraoui et al ,2012)

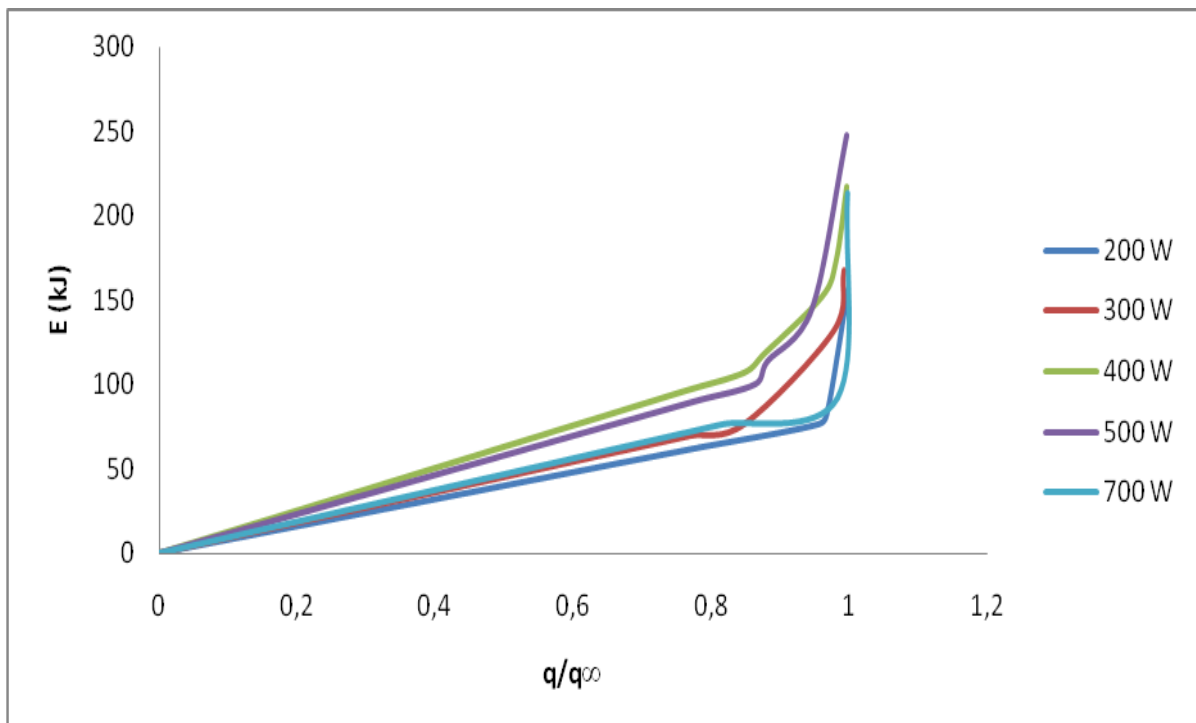


Nous pouvons remarquer à partir des figures (3.17) et (3.18) qu'au départ, pour de faibles valeurs du rapport  $q/q_\infty$ , la différence entre les consommations n'est pas significative. Cependant, lorsque ce rapport augmente, la différence de consommation devient très importante, elle peut atteindre les 2/3 de la consommation du procédé traditionnel pour un rapport  $q/q_\infty$  au voisinage de 99%.

Ceci peut être expliqué par le fait qu'au début de l'extraction l'effet des radiations n'est pas conséquent au vu du court temps d'exposition, donc la structure des cellules à ce stade n'est pas encore modifiée. Par contre, pour les rendements supérieurs, le temps d'exposition aux radiations étant plus important, la majorité des cellules éclate et l'huile se trouve libérée à la surface, l'extraction devient plus rapide. De plus le temps mis en jeu pour atteindre des valeurs élevées du rendement est beaucoup moins important dans le cas des procédés assistés par microondes, l'énergie consommée est donc beaucoup plus inférieure que celle consommée lors de l'extraction classique.

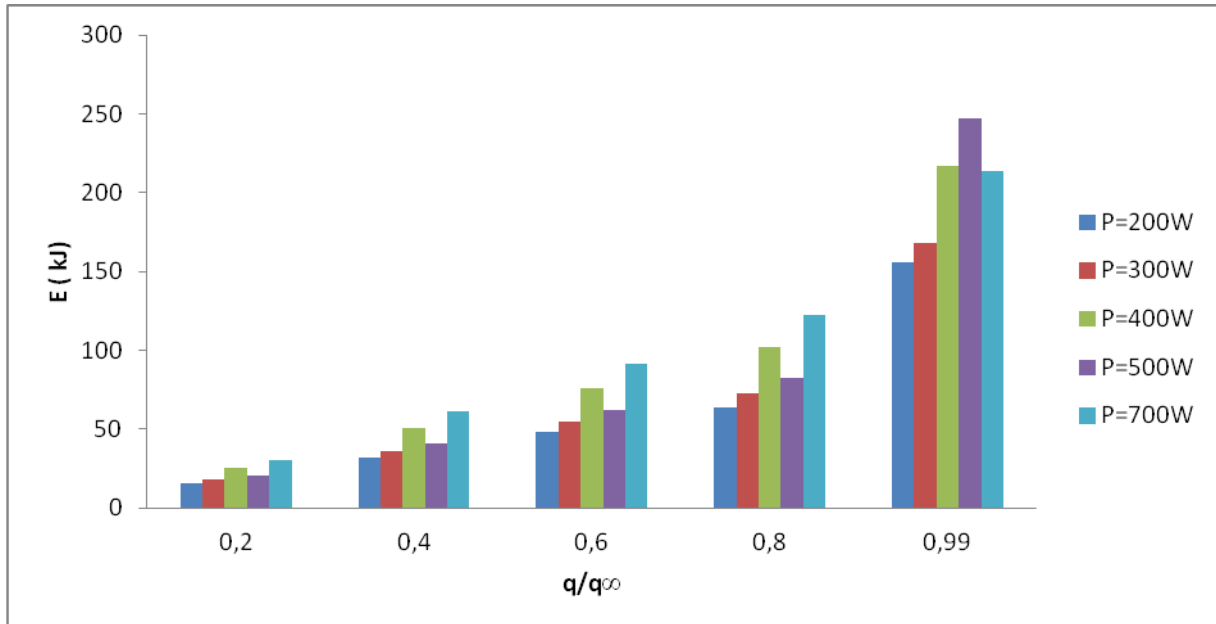
Nous constatons également, que les rendements élevés ( $q/q_\infty$  supérieur à 0,9) s'accompagnent d'une forte consommation énergétique dans le cas du procédé classique. Il n'est donc pas intéressant de chercher l'épuisement total de la matière végétale puisque ceci implique une grande consommation d'énergie pour une faible augmentation du rendement.

Avec la même méthode de calcul nous avons pu simuler l'énergie consommée en fonction pour les différentes puissances de chauffages du four micro-ondes. Les résultats obtenus sont représentés dans la figure (3.19)



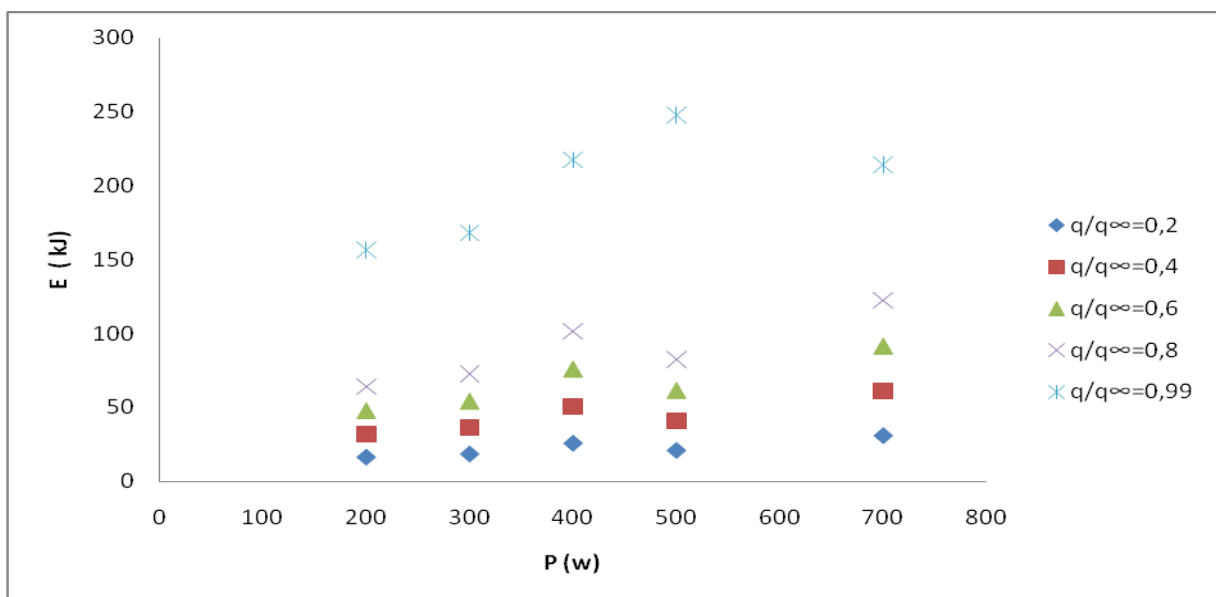
**Figure 3. 19:** Simulation de la consommation énergétique en fonction du rendement de l'extraction (sahraoui et al ,2012)

De la figure (3.19) nous remarquons les courbes peuvent être divisé en deux régions distinctes, une première où l'énergie consommée est proportionnel au rendement, la partie linéaire, et une seconde où l'énergie consommée évolue plus rapidement voir exponentiellement avec le rendement.



**Figure 3. 20 :** Comparaison de la consommation énergétique pour les différents rendements en HE (sahraoui et al ,2012)

La figure (3.20) montre nettement que le passage de 80 % de production d'huile à 99.9 %, nécessite approximativement le double de l'énergie consommée pour produire seulement 20 % d'huile essentielle supplémentaire.



**Figure 3. 21:** Énergie consommée en fonction des puissances délivrées par le four à micro-ondes (sahraoui et al ,2012)

La variation de l'énergie consommée en fonction des puissances délivrées par le four à micro-ondes, montrent clairement que quel que soit le rendement, l'énergie consommée présente un minimum pour une puissance de four à micro-ondes de 200W. L'optimum énergétique est donc atteint pour 200W.

❖ **Farhat et al (2009)**

Farhat et ses collaborateurs ont étudié l'influence de la puissance micro-ondes. Pour cela, ils ont fait varier cette dernière de 50 à 400 Watt tout en ayant fixé le débit de vapeur à 25 g/min. Pour calculer la consommation énergétique à différentes puissances de chauffe, il nous faut tout d'abord calculer les puissances électriques consommées par le générateur de vapeur et la puissance consommée par le four microondes. Ceci se fera grâce aux données relatives à la consommation électrique du procédé classique (SDF) au débit optimal de 25 g/mn, et celui du procédé assisté par microondes (MSDF) au même débit et à la puissance optimale délivrée de 200W (Tableau 3.7)

**Tableau 3. 7 :** Données relatives à l'extraction d'huile essentielle dans les conditions optimales par MSDF et SDF

	$E_{elec}$ (kWh /kg d'HE)	$q_{\infty}$ (%)	$M_{mv}$ (g)	$t_{\infty}$ (min)
<b>MSDF</b>	86,42	4,4	30	3
<b>SDF</b>	423,83	4,4	30	20

À partir de l'équation (3.8), nous avons la puissance du générateur qui est égale à 1,68 kW, cette puissance reste la même pour toutes les expériences menées à 25 g/min.

Concernant le procédé assisté par micro-ondes  $E_f$ , ayant l'énergie consommée par le générateur de vapeur et l'énergie globale consommée pour le procédé MSDF, nous pouvons déduire l'énergie consommée par le four à micro-ondes à partir de l'équation (3.9) et donc la puissance absorbée pour délivrer une puissance de chauffe de 200W. Cette valeur nous permettra de trouver la puissance absorbée par le four pour délivrer toutes les autres puissances de l'expérience.

$$E_f = E_{MSDF} - E_{g.v} \tag{3.9}$$

L'énergie consommée par le générateur se détermine comme suit :

$$E_{g.v} = P_{g.v} \times t_{\infty MSDF} \tag{3.10}$$

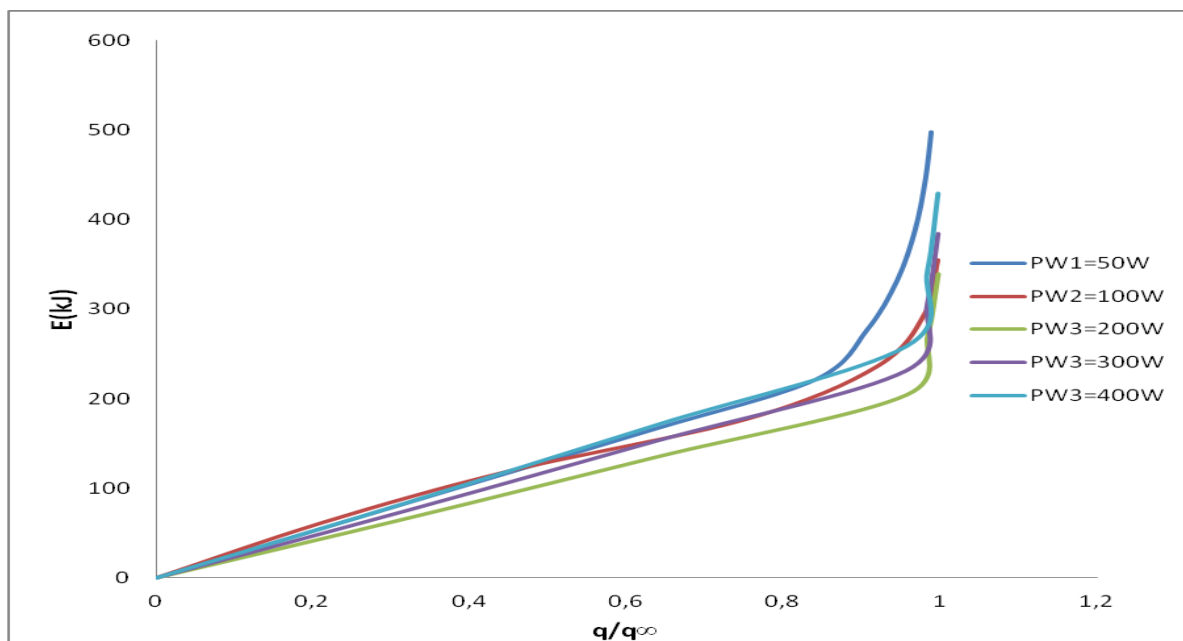
Après calcul, nous avons trouvé que la puissance consommée par le four micro-ondes est égale à 600 W pour délivrer une puissance de 200 W, delà nous déduisons que le four microondes consomme 3 W pour un 1W délivrés.

Ces résultats nous ont permis de calculer la puissance consommée par le four à microondes pour chaque valeur de puissance délivrée (50, 100, 300 et 400W). Ceci nous a donné accès à la puissance globale consommée pour chaque expérience. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau 3. 8:** Calculs de l'énergie globale consommée pour le procédé MSDF différentes puissances

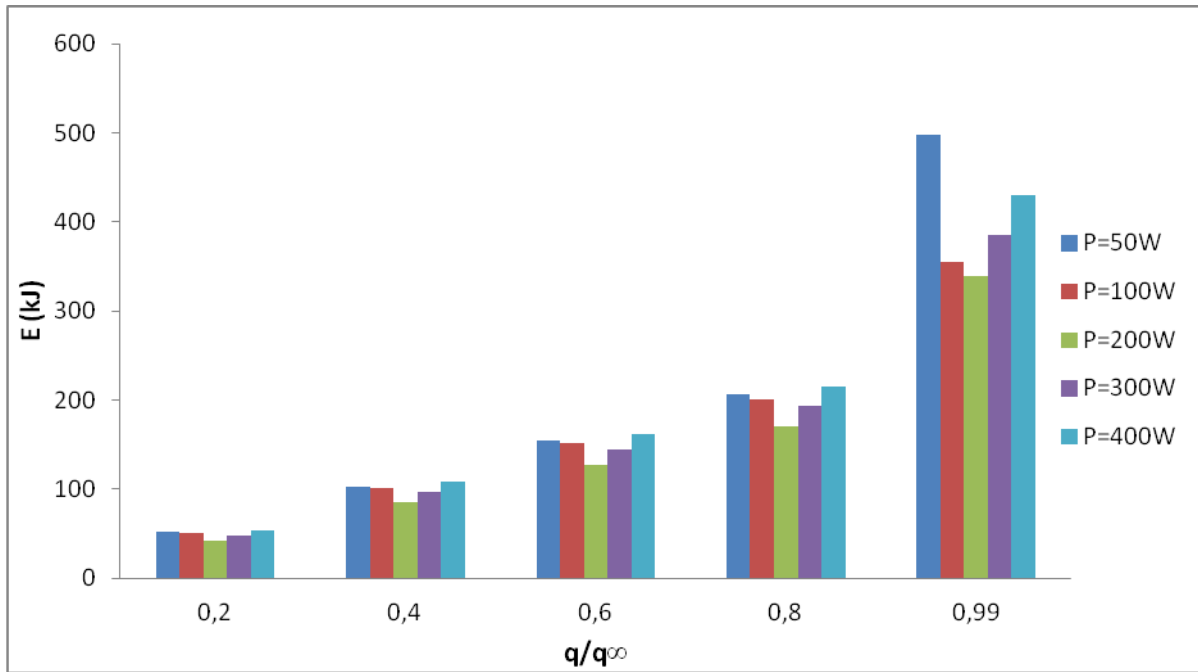
Puissance de chauffe (W)	$t_{\infty}$ (min)	$P_f$ (W)	$E_f$ (kJ)	$E_{g.v}$ (kJ)	$E$ (kJ)	$P$ (kW)
50	4,5	150	40,5	450,9	491,4	1,82
100	3	300	54	300,6	354,6	1,97
200	2,5	600	90	250,5	340,5	2,27
300	2,5	900	135	250,5	385,5	2,57
400	2,5	1200	180	250,5	430,5	2,87

Une fois ces puissances déterminées, nous pouvons simuler la consommation énergétique grâce à l'équation (3.5). Les résultats obtenus sont donnés par la figure (3.22).

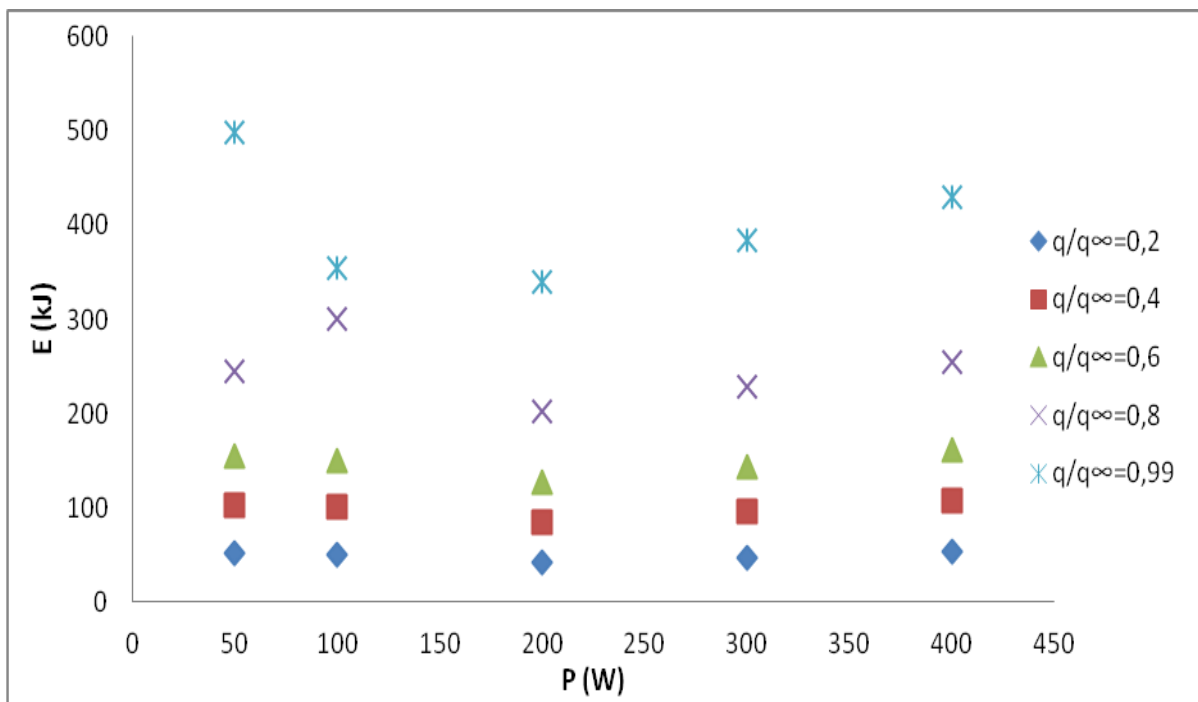


**Figure 3. 22 :** Simulation de la consommation énergétique en fonction du rendement de l'extraction (Farhat et al ,2009)

De ces courbes, nous remarquons une région où la variation est linéaire pour toutes les puissances, pour  $q/q_{\infty}$  inférieurs à 0,8, et une région où il y a une évolution rapide, surtout pour la puissance de chauffe de 50 W, ce qui montre que le procédé consomme beaucoup d'énergie vers la fin du processus.



**Figure 3. 23:** Comparaison de la consommation énergétique pour les différents rendements en HE (Farhat et al ,2009)



**Figure 3. 24 :** Énergie consommée en fonction des puissances délivrées par le four à micro-ondes (Farhat et al ,2009)

De l'examen des courbes de la figure (3.24), il ressort que c'est intéressant de travailler à une puissance de chauffe de 200 W, en effet quelque soit le rapport  $q/q_{\infty}$  la consommation énergétique est minimale pour  $P= 200W$ .

### **3.6 Conclusion**

Les calculs effectués dans ce chapitre nous ont permis d'estimer l'efficacité énergétique du procédé d'entraînement à la vapeur d'eau des fleurs de lavande assisté par micro-ondes par rapport au procédé classique analogue, en effet les résultats obtenus ont révélé que ce dernier est environ 2 fois plus consommateur en énergie pour un même rendement.

Nous avons aussi constaté que les procédés d'extraction des huiles essentielles assistés par micro-ondes ou non, consomment énormément d'énergie vers la fin de l'extraction. En effet, la consommation d'énergie entre un taux de récupération de 80% et 99% peut représenter jusqu'à 50% de l'énergie totale. Par conséquent, il est préférable d'arrêter l'extraction pour un taux de récupération dans les environs de 90 %, d'autant plus que des études ont montré que la qualité de l'huile récupérée en fin d'extraction serait de moins bonne qualité.

## ***CONCLUSION GÉNÉRALE***

Ces dernières années, la recherche a permis le développement de technologies performantes, économiques, propres et durables telles que celles utilisant les fluides supercritiques, les ultrasons, les micro-ondes, le solaire et la biomasse.

Ce présent travail, a permis de vérifier que le procédé d'entraînement à la vapeur d'eau devient, effectivement, énergivore à partir d'un certain rendement en huile essentielle, de ce fait, des économies d'énergie peuvent être réalisées en évitant d'aller au-delà de ce rendement tout en travaillant sous des conditions opératoires optimales. Et que les procédés innovants sont plus efficaces énergétiquement que leurs analogues classiques.

Afin d'aborder ce problème nous avons divisé le travail en deux

Dans un premier temps, nous avons appliqué plusieurs modèles aux cinétiques d'extractions des huiles essentielles : premier ordre, à deux constantes de temps, modèle de Babu et un modèle à deux périodes de temps, et nous avons constaté que seule le modèle à de période de temps a simulé correctement les résultats expérimentaux.

Dans un second temps, nous avons utilisé les équations établies lors de la simulation des cinétiques d'extraction avec le modèle de deux périodes de temps, pour exprimer l'évolution de l'énergie consommée en fonction de la quantité d'huile essentielle produite.

Les résultats trouvés montrent, que cette évolution de la consommation énergétique se fait en deux étapes : une première étape linéaire où la consommation énergétique est proportionnelle au du rendement et une seconde ou cette consommation varie exponentiellement.

Par le biais de cette approche de modélisation, nous avons montré que le maximum de production en huile essentielle, correspondant à l'épuisement total de la matière végétale peut ne pas représenter un optimum économique ni écologique.

## ***BIBLIOGRAPHIE***

**AFNOR, 2000** .Huiles essentielles. Ed. PARA Graphic. Tome1 – Echantillonnage et méthode d'analyse 471 P. Tome 2 – Volume 1 Monographie relative aux huiles essentielles 323 P. Tome 2 – Volume 2 Monographie relative aux huiles essentielles 663 P.

**Babu G. D. et Singh B ,2009**. Simulation of Eucalyptus cinerea oil distillation: A study on optimization of 1,8-cineole production. *Biochemical Engineering Journal*, 226–231.

**Balandrin M.F., Klocke J.A., Wurtele E.S and W.H. Bollinger W.H., 1985** .Natural Plant Chemicals: Sources of Industrial and Medicinal Materials, *Science*, Vol. 228, N°4704, pp. 1154 – 1159.

**Benyoussef, E.H et Saibi, S, 2013**.Influence of essential oil composition on water distillation kinetics. *Flavour and Fragrance Journal* 28, 300-308.

**Bruneton J, 1993**. Pharmacognosie Phytochimie Plantes médicinales, Tec&Doc, Lavoisier, Paris, , p915, pp 570-583

**Bruneton J, 1995**.Pharmacologie, phytochimie, plantes médicinales. Tech &doc-lavoisier, Paris ,526 P.

**Chograni H, Messaoud C, Boussaid M, 2008**.Genetic diversity and population structure in Tunisian *Lavandula stoechas* L. and *Lavandula multifida* L. (Lamiaceae). *Biochemical Systematics and Ecology*, 36, 349-359.

**Craveiro A.A, Matos F.J.A , Alencar J.W et Plumel, M.M, 1989**.Microwave oven extraction of an essential oil.*Flavour and Fragrance Journal*.

**Crouzet J, 1996**. Arômes alimentaires. Techniques de l'ingénieur, F 4 100, Paris.

**Dubey N. , Srivastava B. and Kumar A., 2008**.Current Status of Plant Products as Botanical Pesticides in Storage Pest Management, *Journal of Biopesticide*, Vol. 1, N°2; pp. 182 – 186.

**Farhat A, Ginies C, Romdhane M, Chemat F, 2009**.Eco-friendly and cleaner process for isolation of essential oil using microwave energy Experimental and theoretical study, *Journal of Chromatography A*, 1216 5077–5085.

**Funk et Wagnalls, 2004**.Encyclopédie britannique Funk &Wagnalls. URL :<http://www.Funkandwagnalls.com>.

**Franchomme P et Penoel D, 1990**. Matière médicale aromatique fondamentale (317-406), livre quatrième, l'aromathérapie exactement, encyclopédie de l'utilisation thérapeutique des huiles essentielles. R.Jollois Edit., Limoge, 446p.



**Gilly G, 2005.** Les plantes aromatiques et les huiles essentielles à Grasse: botanique, culture, chimie, production et marché. Editions Le Harmattan.

**Guenther, 1948.** The Essential Oils, D. Van Nostrand Company, New York.

**Heath H.B , 1981.** 'Source Book of Flavors, Springer, XXVI, 864 p.

**Hardman R, 2002.** Medicinal and Aromatic Plants - Industrial Profiles, volume 29: Lavender. Taylor & Francis, London.

**Koul, 2004.** Steam distillation of lemon grass (Cymbopogon) Indian Journal of Chemical Technology Vol. 11, 135-139.

**Lamarti ,Badoc , Deffieux et Carde , 1994.** Biogénèse des Monoterpènes-II-La chaîne isoprénique. Bull. Soc.Pharm. Bordeaux 133, 79-99

**Likens and Nicker-son, 1964.** Proc. Amer. Soc. Brew. Chem5. Cité in Godefroot, M., Sandra, P. & Verzele, M. 1981 New method for quantitative essential oil analysis. J. chromatography . A203, 325-335

**Lucchesi , 2005.** Extraction sans solvant assistée par micro-ondes. Conception et application à l'extraction des huiles essentielles. Thèse de la faculté des Sciences et technologies. Université de la Réunion, France

**Naik S.N, Lentz H, Maheshwari, R.C, 1989.** Extraction of perfumes and flavours from plant materials with liquid carbon dioxide under liquid-vapor equilibrium conditions. Fluid Phase Equilibria, 49, 115-126.

**Paré, J. R. J, Sigouin M, Lapointe J, 1991.** European patent request, No. 0398798.

**Sahraoui, 2012.** Mise au point d'un nouveau procédé d'extraction d'huiles essentielles assisté par micro-ondes: Application à la valorisation de plantes locales et comparaison avec les procédés conventionnels. Thèse de doctorat. École Nationale Polytechnique d'Alger.

**Schmidt, 1981.** Hydrodiffusion SA, brevet suisse No 2473058.

**Sovova, Aleksovski, 2006.** Modèle mathématique pour l'hydrodistillation des huiles essentielles Flavour.Frag.j. (21) 881-889.

**Teisseire, 1991.** Chimie des substances odorantes. Tec et Doc., Lavoisier, Paris, France. 480p

**Wichtk, Anton, 1999.** Plantes thérapeutiques, Technique et Documentation, Paris.