

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



Projet de fin d'études

Thème :

**Modélisation de la consommation
énergétique dans les procédés
d'extraction**

Proposé et dirigé par :

Pr. BENYOUSSEF E-H

Etudié par :

MALKI Imane

Soutenu le 19 Juin 2014 devant le jury composé de :

Pr DERRICHE R.....Président
Pr CHARCHARI S.....Examineur
Pr MOHELLEBI FExamineur
Pr BENYOUSSEF E-H..... Rapporteur

Promotion 2014

Remerciements

Tout d'abord, je remercie notre Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir cet humble travail.

Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide précieuse et l'encadrement de Monsieur **Benjoussef** à qui j'adresse un très grand merci pour la qualité de son encadrement exceptionnel, je lui témoigne toute ma gratitude et ma reconnaissance pour ses précieux conseils et diriges, pour sa patience, ses encouragements, sa rigueur, et, aussi de m'avoir poussé à sa manière d'aller jusqu'au bout de ce travail, Je le remercie également pour ses critiques parfois dures mais pertinentes lors de la relecture de mon manuscrit. Et même si cela n'a pas toujours été facile, Cela a été vraisemblablement fructueux et m'a permis de donner le meilleur de moi-même.

Je tiens également à remercier les membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de siéger à ma soutenance, tout particulièrement Madame **Derriche Ratiba** pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire, ainsi que Madame **Charchari Stoika** et Madame **Mohellebi Ferroudja** d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens aussi à remercier tous mes professeurs sans exception aucune, et plus particulièrement

Professeur **Chitour** pour toute leur générosité, de nous avoir transmis cette richesse inépuisable qu'est le savoir à mes camarades et moi, pour la qualité de leurs conseils, pour leurs soutiens permanents, pour leurs encouragements et pour toute la patience dont ils ont toujours su faire preuve.

Aussi je ne remercierai jamais assez toutes les personnes qui m'ont soutenue et précieusement aidée d'une manière ou d'une autre à mener à terme ce projet, je citerai Mr Fouad Maliki, Mme Amina Ghomri , Vlada Velikovic, Mme Wafa Mouro, Tonton Mounir, ainsi a ma copine Souhila et toute sa famille pour leurs gentillesse et leur soutien,

Sans oublier ma deuxième famille adorée de Blida, la famille Chamma je citerai Ammou Brahim, Tata fatiha, Azzeddine ,Abderezzak ,Hafsa, Ahmed, Saliha, Fewzi.

Enfin je remercie toutes mes chères copines de combat pour toute l'affection et le soutien que nous avons apporté les unes aux autres durant ces cinq années de labeur, pour tous les moments inoubliables que nous avons partagé ensemble et tous les souvenirs magiques que nous avons créés... Merci Wahiba, Soumeya, Samira, Nesrine, Yasmine, Sarah, Hanane, Imene, Amina, Kaouthar, Sabrina et Asma.

Dédicaces

A mon exemple éternel, à celui qui manque atrocement à ma vie, celui que je n'ai connu que 10 années de mon existence, mais de qui j'ai tant appris, à celui que j'aurais souhaité la présence plus que jamais et qui aurait certainement été très fier de moi aujourd'hui...que dieu te garde dans son vaste paradis, toi l'homme de ma vie ...toi mon père.

A celle qui s'est toujours dévouée et sacrifiée pour moi, celle qui m'a aidée du mieux qu'elle pouvait pour réussir ; celle qui a toujours été là dans mes moments de détresse, ma très chère mère.

A mon cher grand père Jeddou Mohamed qui m'a élevée et protégée, à celui qui m'a inculqué les valeurs et les principes de la vie.

A mon adorable et si affectueuse grand-mère Mima Fatiha.

*A mes frères Madjid, Elias, ma petit sœur Razeka, mes rayons de soleil, mes espoirs...
À l'avenir*

A mon meilleur ami adoré Azzeddine.

A toutes les personnes qui m'ont toujours aidée et encouragée, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnée durant mon chemin d'études,

A tous mes professeurs, à tous mes amis, à tous mes camarades avec qui j'ai partagé tant de moments mémorables...

Je dédie cet humble travail.

Imene

ملخص:

وضع نموذج لاستهلاك الطاقة خلال استخراج الزيوت الأساسية

يتناول هذا العمل في اول مرحلة تطبيق نماذج مختلفة متعلقة بنقل المادة. حاولنا وضع نموذج جديد يستند على مساهمة مختلف مكونات الزيوت الأساسية وتوزيعها أيضا داخل النباتات على مردود النبتة، ثم درسنا مقارنة استهلاك الطاقة عند استخراج الزيوت الأساسية بالطرق الحديثة والتقليدية. اظهرت النماذج المستخرجة تسارع حركة نقل المادة في بداية عملية استخراج الزيوت الأساسية لتتباطأ مع مرور الوقت. نتا ئج الدراسة بينت ان استخدام الطرق الحديثة (الميكروويف) يساهم في خفض مستوى الطاقة المستهلكة بالمقارنة مع الطرق التقليدية وهذا يدخل في إطار التطور المستديم (الكيمياء الخضراء).
الكلمات الأساسية: الزيوت الأساسية، النمذجة، التوزيع، الاستخراج، الحركية، ميكروويف، استهلاك الطاقة.

Résumé :

Modélisation de la consommation énergétique lors de l'extraction des huiles essentielles.

Cette étude consiste en un premier temps à appliquer différents modèles relatifs au transfert de matière entre phases.

Nous avons tenté d'élaborer une nouvelle approche de modélisation basée sur la contribution des divers constituants de l'huile, ainsi leur distribution au sein de la matière végétale dans l'expression globale du rendement.

Puis nous avons étudié la maîtrise de la consommation d'énergie dans le cas des procédés d'extraction assistée par micro-onde (innovant) et classiques des huiles essentielles.

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. Nous avons constaté qu'il est avantageux d'utiliser les procédés d'extraction assistés par micro-onde car la consommation énergétique est faible pour ces derniers par rapport aux procédés classiques. Cela rentre dans le cadre de développement durable (Chimie verte).

Mots clés : huiles essentielles, modélisation, procédé d'extraction, distribution, assisté par micro-onde, cinétique, consommation énergétique.

Abstract :

Modeling of energy consumption in extraction processes.

This study consists first to apply different models for the mass transfer between phases.

We tried to develop a new modeling approach based on the contribution of the various components of the oil, and their distribution within the plant material in the overall expression of performance.

Then we studied the mastery of consumption of energy in the case of assisted by microwave (innovative) and conventional essential oils extraction processes.

For this purpose, the mass transfer model shows the top fast kinetics of the process and which tends to slow down over time. We found it advantageous to use the extraction assisted by microwave methods because energy consumption is low for these compared to conventional methods.

Keywords: essential oils, modeling, extraction process, distribution, assisted by microwave, kinetic energy consumption.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Modélisation de transfert de matière et application	3
I.1 Hypothèses du modèle :.....	4
I.2. Développement du modèle :.....	5
I.2.1. Expression du rendement en huile superficielle :.....	5
I.2.2. Expression du rendement en huile interne.....	6
I.3. Application de l'équation du modèle et discussions :.....	7
I.3.1. Modélisation des cinétiques d'extraction par hydrodistillation et par les procédés d'hydrodistillation assistés par micro-onde :.....	8
Cinétique d'extraction du thym.....	8
Cinétique d'extraction du romarin.....	10
Cinétique d'extraction des fruits du citrus.....	13
Cinétique d'extraction d'arbousier.....	15
• Cinétique d'extraction de genévrier.....	19
Interprétation des résultats :.....	292
I.3.2. Application des modèles sur les résultats d'extraction par hydrodiffusion et hydrodiffusion assisté par micro-onde :.....	24
Cinétiques d'extraction de zeste d'orange.....	24
Cinétique d'extraction de la lavande.....	26
Interprétation des résultats :.....	29
I.3.3. Application des modèles sur les résultats d'extraction par le fluide supercritique (SFE).....	30
Cinétique d'extraction de la lavande.....	30
Interprétation des résultats :.....	33
Conclusion :	33

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors de l'extraction des huiles essentielles.....	34
II.1. simulation des vitesses d'extraction.....	35
II.1.1. Influence de la puissance sur la vitesse d'extraction par hydrodistillation ...	36
Interprétation des résultats :.....	37
II.1.2. Influence de la puissance sur la vitesse d'extraction par hydrodiffusion :	38
Interprétation des résultats :.....	39
II.1.3. Influence de la température sur la vitesse d'extraction par fluide supercritique :.....	39
Interpétationdes résultats.....	40
II.1.3. Influence de l'utilisation des micro-ondes sur la vitesse d'extraction :	40
Interprétation des résultats :.....	42
II.2. Modélisation énergétique :.....	42
II.2.1. Evolution de la consommation énergétique dans les procédés d'extraction par hydrodistillation :.....	43
Interprétation des résultats :.....	44
II.2.2. Influence de la puissance sur la consommation énergétique dans les procédés d'extraction par hydrodiffusion :	45
Interprétation des résultats :.....	46
II.2.3. Influence de l'utilisation des micro-ondes sur la consommation énergétique.....	46
Interprétation des résultats :.....	48
Conclusion	54
Conclusion générale.....	55
Bibliographie..	57

Liste des figures

Figure I.1. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de thym par les 4 modèles avec les deux procédés MHD et HD.....	9
Figure I.2. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de romarin par les 4 modèles avec les deux procédés MHG et HD.....	12
Figure I.3. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de pelures d'agrumes frais par les 4 modèles avec les deux procédés MAD et HD.....	14
Figure I.4. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier en fonctions des différentes puissances par le modèle 1 avec le procédé HD.....	15
Figure I.5. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier en fonctions des différentes puissances par le modèle 2 avec le procédé HD.....	16
Figure I.6. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier en fonctions des différentes puissances par le modèle 3 avec le procédé HD.....	16
Figure I.7. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier en fonctions des différentes puissances par le modèle 4 avec le procédé HD.....	17
Figure I.8. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de genévrier en fonctions des différentes puissances par le modèle 1 avec le procédé HD.....	19
Figure I.9. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de genévrier en fonctions des différentes puissances par le modèle 2 avec le procédé HD.....	20
Figure I.10. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de genévrier en fonctions des différentes puissances par le modèle 3 avec le procédé HD.....	20
Figure I.11. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de genévrier en fonctions des différentes puissances par le modèle 4 avec le procédé HD.....	21
Figure I.12. Photos microscopiques des feuilles du thym	23

Figure I.13. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle du zeste d'orange par les 4 modèles avec les deux procédés MSDF et SDF.....	25
Figure I.14. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par le modèle 1 du les procédés (MSDF, SDF).....	27
Figure I.15. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par le modèle 2 avec le procédé (MSDF).....	27
Figure I.16. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par le modèle 3 avec le procédé (MSDF).....	28
Figure I.17. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par le modèle 4 avec le procédé (MSDF).....	28
Figure I.18. Photos microscopiques montrant la morphologie des trichomes de la lavande.....	29
Figure I.19. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par le modèle 1 avec le procédé SFE.....	31
Figure I.20. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par le modèle 2 avec le procédé SFE.....	31
Figure I.21. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par le modèle 3 avec le procédé SFE.....	32
Figure I.22. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par le modèle 4 avec le procédé SFE.....	32
Figure II.1 : l'évolution de la vitesse d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier en fonction du temps sous les différentes puissances de chauffe, simulée par les 4 modèles (procédé d'extraction HD).....	36

Figure II.2 : L'évolution de la vitesse d'extraction de l'huile essentielle de genévrier en fonction du temps sous les différentes puissances de chauffe, simulée par les 4 modèles (procédé d'extraction HD).....	37
Figure II.3 : L'évolution de la vitesse d'extraction de l'huile essentielle de la lavande en fonction du temps sous les différentes puissances de chauffe, simulée par les 4 modèles, (procédé d'extraction SDF).....	38
Figure II.4 : L'évolution de la vitesse d'extraction de l'huile essentielle de la lavande en fonction du temps sous les différentes températures, simulée par les 4 modèles, (procédé d'extraction fluide supercritique).....	39
Figure II.5 : L'évolution de la vitesse d'extraction de l'huile essentielle de la lavande par les deux méthodes d'extraction hydrodiffusion et hydrodiffusion assisté par micro-onde, simulée par les 4 modèles.....	41
Figure II.6 : L'évolution de la vitesse d'extraction de l'huile essentielle du thym par les deux méthodes d'extraction hydrodistillation (HD) et hydrodistillation assisté par micro-onde(MHD), simulée par les 4 modèles.....	42
Figure II. 7 : L'évolution de la consommation énergétique par gramme d'huile essentielle d'arbousier extraite en fonction du temps sous les différentes puissances de chauffe, simulée par les 4 modèles (Le procédé d'extraction HD).....	44
Figure II.8 : L'évolution de la consommation énergétique par gramme d'huile essentielle de genévrier extraite en fonction du temps sous les différentes puissances de chauffe, simulée par les 4 modèles (Le procédé d'extraction HD).....	44
Figure II.9 : L'évolution de la consommation énergétique par gramme d'huile essentielle de la lavande en fonction du temps sous les différentes puissances de chauffe, simulée par les 4 modèles, (Le procédé d'extraction SDF).....	45
Figure II.10 : L'évolution de la consommation d'énergie par gramme d'huile de la lavande, par les deux méthodes d'extraction hydrodiffusion (SDF) et hydrodiffusion assisté par micro-onde(MSDF), simulée par les 4 modèles.....	47

Figure II.11 : l'évolution de la consommation d'énergie en fonction du temps réduits dans le cas des deux procédé d'extraction (MSDF)et (SDF),simulé par le modèle2.....	48
Figure II.12 : L'évolution du rapport R/R_{∞} en fonction du temps, dans le cas de l'extraction de l'huile d'arbousier par le procédé d'extraction (HD).....	49
Figure II.13 : L'évolution du rapport R/R_{∞} en fonction du temps, dans le cas de l'extraction de l'huile de genévrier par le procédé d'extraction (HD).....	50
Figure II.14 : L'évolution du rapport R/R_{∞} en fonction du temps, dans le cas de l'extraction de l'huile de la lavande par le procédé d'extraction (SDF).....	50
Figure II.15 : L'évolution du rapport R/R_{∞} en fonction du temps, dans le cas de l'extraction de l'huile de la lavande par le procédé d'extraction (MSDF).....	51
Figure II.16 : L'évolution du rapport R/R_{∞} en fonction du temps, dans le cas de l'extraction de l'huile de la lavande par le procédé d'extraction CO_2 supercritique...51	51
Figure II.17 : L'évolution de la consommation énergétique en fonction du rapport R/R_{∞} . Pour l'arbousier dans le cas de procédé d'extraction (HD).....	52
Figure II.18 : L'évolution de la consommation énergétique en fonction du rapport R/R_{∞} .Pour le genévrier dans le cas de procédé d'extraction (HD).....	52
Figure II.19 : L'évolution de la consommation énergétique en fonction du rapport R/R_{∞} . Pour la lavande dans le cas de procédé d'extraction (SDF).....	53
Figure II.20 : L'évolution de la consommation énergétique en fonction du rapport R/R_{∞} Pour la lavande dans le cas de procédé d'extraction (MSDF).....	53

Liste des tableaux

Tableau I.1. Paramètres évalués à l'aide des 4 modèles pour l'huile de thym.....	10
Tableau I.2. Paramètres évalués à l'aide des 4 modèles pour l'huile de romarin.....	11
Tableau I.3. Paramètres évalués à l'aide des 4 modèles pour l'huile des fruits du citrus.....	13
Tableau I.4. Les paramètres des 4 modèles proposés pour l'huile essentielle d'arbousier.....	18
Tableau I.5. Les paramètres des 4 modèles proposés pour l'huile essentielle d'genévrier.....	22
Tableau I.6. Paramètres évalués à l'aide des 3 modèles pour l'huile de zeste d'orange.....	24
Tableau I.7. Paramètres évalués à l'aide des 3 modèles pour l'huile de la lavande....	26
Tableau III.8. Paramètres évalués à l'aide des 4 modèles pour l'huile de la lavande.	30

Abréviations et symboles

HD : hydrodistillation ;

MHD : Hydrodistillation assistée par micro-ondes ;

MHG : Hydrodiffusion assistée par micro-ondes ;

SFE : Extraction par fluides supercritiques ;

SDF : entrainement à la vapeur d'eau ;

MSDF : entrainement à la vapeur d'eau assisté par micro-onde ;

x_v : La concentration massique de l'huile dans la phase vapeur ;

(Masse d'huile/masse de vapeur) ;

x_e : La concentration massique de l'huile dans l'eau bouillante (Masse d'huile/ masse d'eau) ;

x_c : La concentration massique de l'huile à la surface du solide t ;

(Masse d'huile / masse de matière végétale) ;

k_e : le coefficient de partage du soluté entre la surface du solide et l'eau bouillante.

k_v : le coefficient de partage vapeur- liquide.

x_s : concentration massique de l'huile hydrosoluble présente dans le flux de cohobage (masse d'huile/masse d'eau) ;

Q : débit massique de vapeur (masse de vapeur/temps) ;

N : masse de la matière végétale dans le ballon (masse).

Y(t) : le rendement en huile essentielle (masse d'huile extraite/masse de matière végétale)

K : constante cinétique (temps⁻¹) ;

y_d : rendement à partir des cellules intactes (masse d'huile/ masse de matière végétale) ;

$y_{d\infty}$: concentration massique finale correspondant à l'étape de diffusion (masse d'huile/ masse de matière végétale) ;

E : Energie ;

Introduction générale

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

Ce qui accélère le rythme d'épuisement des ressources énergétiques et provoque une dégradation de l'environnement, l'optimisation de l'énergie est donc un enjeu essentiel pour faire face à des défis écologiques et économiques croissants.

La modélisation est une construction mathématique capable de représenter une partie bien définie de la réalité. Cette technique est indispensable lors du développement des processus, et spécialement lors du passage de l'échelle laboratoires à l'échelle pilote, puis l'échelle industrielle car les modèles, une fois établis, offrent la possibilité de généralisation et d'ajustement des données expérimentales ce qui constitue une étape primordiale lors de la simulation des procédés.

De nombreux modèles ont été proposés dans la littérature avec des succès divers afin de décrire la diffusion du soluté du solide vers la masse fluide. Ces modèles sont basés sur des bilans de matière entre les deux phases et l'intégration des équations différentielles nécessite certaines hypothèses simplificatrices .

L'objectif de ce travail est d'élaborer un modèle mathématique applicable à l'ensemble des procédés d'extraction des huiles essentielles en considérant qu'une partie de l'huile est facilement extractible, déposée sur la surface de la matière végétale dans des trichomes glandulaires ou dans des cellules cassées qui serait régie par un équilibre thermodynamique, alors que l'autre partie est située dans des

cellules intactes à l'intérieur du solide dont la cinétique d'extraction est gouvernée par les lois diffusionnelles, et le comparer avec d'autres modèles.

En second lieu, nous avons modélisé la consommation énergétique lors des procédés d'extraction assistée par micro-onde (innovant) et les procédés classiques.

Ainsi, notre travail est structuré en deux chapitres :

Le premier chapitre, est réservé à la description de la démarche adoptée permettant le développement d'un modèle prédictif tenant compte de la distribution non uniforme de l'huile au sein du végétal et de le comparer aux différents modèles mathématiques rapportés dans la littérature.

Le deuxième et dernier chapitre est consacré au développement de modèles traduisant l'évolution de la consommation énergétique lors de l'extraction des huiles essentielles et son application dans le cas des procédés d'extraction innovants et classiques.

Chapitre I :

Modélisation du transfert de matière et application

L'objectif de ce travail est de formuler un modèle mathématique applicable à l'ensemble des procédés d'extraction basé sur l'hypothèse qu'une partie de l'huile essentielle serait localisée dans des cellules entières à l'intérieur de la plante difficilement accessibles avec une diffusion lente, alors que l'autre fraction se trouvant à la surface de la matière végétale cas des cellules ou trichomes glandulaires cassées plus facilement accessibles à partir desquelles l'huile peut être instantanément libérée. Ce phénomène devrait, en principe, être accentué dans les procédés assistés par micro-ondes. En effet ; le rôle des micro-ondes serait d'apporter des modifications au sein du tissu végétal pour que l'huile soit plus accessible à la vapeur [4, 7,8, 10, 11].

Nous pouvons donc considérer deux processus d'extraction simultanés : un processus de lavage superficiel très rapide consistant en l'extraction de l'huile superficielle, et un processus diffusionnel, plus lent, consistant en la récupération des huiles difficilement accessibles.

On peut alors penser que la cinétique rapide serait régie par les lois d'équilibre entre phases alors que la cinétique lente serait gouvernée par les lois de diffusion à travers une matrice solide.

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

I.1 Hypothèses du modèle :

Afin de décrire le transfert de matière, lors du processus d'hydrodistillation, plusieurs hypothèses simplificatrices sont prises en considération ;

- L'huile essentielle est considérée comme un soluté unique ayant des propriétés physiques et diffusionnelles moyennes. Ce qui revient à dire que le soluté est considéré comme un composé unique, bien qu'il soit en réalité composé d'une grande variété de constituants. Hypothèse qui doit être prise avec beaucoup de précautions et qui n'est pas aisément généralisable d'après les récents travaux de Benyoussef et al [1].
- Les particules ont la même taille, la même forme, et possèdent le même contenu d'huile initialement ;
- Initialement, une fraction d'huile essentielle est présente à la surface du substrat végétal, alors que l'autre fraction se situe à son intérieur ;
- Le système se comporte comme un lit fluidisé (les particules solides ne se touchent pas et sont en suspension dans le liquide) à trois phases (solide, liquide et vapeur). On pourra ainsi supposer que les phases liquides et solides sont parfaitement mélangées, alors que la phase gazeuse pourra être supposée en écoulement piston.
- La résistance au transfert de matière est supposée négligeable dans l'eau bouillante et la phase vapeur et ainsi l'équilibre est établi quasi instantanément entre les phases. C'est d'ailleurs, cette hypothèse admise par l'ensemble des théories de transfert de matière entre phases qui nous laisser supposer que cinétique d'extraction de l'huile superficielle serait régie par l'équilibre entre phases et traduit par la relation (I.1) [2].

$$x_v = k_v x_e = k_v k_e x_c \quad (I.1)$$

x_v : La concentration massique de l'huile dans la phase vapeur

(Masse d'huile/masse de vapeur) ;

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

x_e : La concentration massique de l'huile dans l'eau bouillante

(Masse d'huile/ masse d'eau) ;

x_c : La concentration massique de l'huile à la surface du solide t

(Masse d'huile / masse de matière végétale) ;

k_e : le coefficient de partage du soluté entre la surface du solide et l'eau bouillante.

k_v : le coefficient de partage vapeur- liquide.

x_s : concentration massique de l'huile hydrosoluble présente dans le flux de cohobage (masse d'huile/masse d'eau) ;

Q : débit massique de vapeur (masse de vapeur/ temps) ;

N : masse de la matière végétale dans le ballon (masse).

Y(t) : le rendement en huile essentielle (masse d'huile extraite/masse de matière végétale)

- La concentration massique du soluté présent dans le flux de cohobage sortant du séparateur est considérée constante durant tout le processus (eaux de distillation saturées en huile hydrosoluble). Le rendement en huile essentielle collectée dans le séparateur est alors donné par l'expression suivante :

$$y(t) = \frac{Q}{N} \int_0^t (x_v - x_s) dt \quad (I.2)$$

I.2. Développement du modèle :

I.2.1. Expression du rendement en huile superficielle :

On dérive l'équation (I.2), donne :

$$\frac{dy}{dt} = \frac{Q}{N} (x_v - x_s) \quad (I.3)$$

Initialement (début de l'hydrodistillation) on peut considérer que :

x_s a une valeur négligeable ($x_s = 0$).

D'autre part, nous pouvons constater que dans la plupart des cinétiques d'extraction les courbes cinétiques présentent une branche linéaire pour les temps courts.

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

Donc nous avons :

$$\frac{dy}{dt} = \frac{Q}{N} x_v \quad (I.4)$$

Qui donne une valeur constante ;

On peut conclure donc que x_v est constant. L'expression du rendement en huile superficielle y_s peut être simplifiée ainsi :

$$y_s(t) = \frac{Q}{N} x_v t \quad (I.5)$$

D'autre part en considérant les équilibres thermodynamiques entre phases nous avons :

$$k = k_v k_e \quad (I.6)$$

$$x_v = kx_s = k(x_{s0} - y_s) = \frac{y_s N}{Qt} \quad (I.7)$$

Après développement, nous avons :

$$y_s(t) = \frac{x_{s0} t}{t + b} \quad (I.8)$$

Avec :

$$b = \frac{N}{kQ} \quad (I.9)$$

I.2.2. Expression du rendement en huile interne :

Pour l'huile interne nous avons considéré que la diffusion du soluté à partir des cellules intactes obéit au modèle proposé par Milojevic [3], qui stipule que pour une masse donnée de particules en contact avec un fluide d'extraction, la concentration extraite du soluté notée y augmente jusqu'à atteindre une concentration d'équilibre y_∞ suivant l'équation donnée ci-dessous :

$$y(t) = y_\infty (1 - \exp(-Kt)) \quad (I.10)$$

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

Avec :

K : constante cinétique (temps⁻¹) ;

y_d : rendement à partir des cellules intactes (masse d'huile/ masse de matière végétale) ;

$y_{d\infty}$: concentration massique finale correspondant à l'étape de diffusion (masse d'huile/ masse de matière végétale) ;

Le modèle développé est donc exprimé par la somme des deux termes donnés par les expressions (I.8) et (I.10) :

$$y(t) = \frac{x_{c0}t}{t+b} + y_{d\infty}(1 - \exp(-Kt)) \quad (I.11)$$

La valeur maximale du rendement pouvant être obtenue après établissement d'équilibre et donnée pour :

À $t \longrightarrow \infty$ on a

$$\text{Soit : } f = \frac{x_{c0}}{y_{\infty}} \quad \text{et} \quad f' = \frac{y_{d\infty}}{y_{\infty}}$$

$$\text{Avec : } f' = 1 - f$$

L'équation du modèle peut donc être réécrite comme suit :

$$y(t) = y_{\infty} \left(\frac{f \times t}{t+b} + (1-f)(1 - \exp(-Kt)) \right) \quad (I.12)$$

Avec : f : fraction d'huile superficielle et facilement extractible.

I.3. Application de l'équation du modèle et discussions :

Afin de vérifier la validité du modèle développé et de le comparer avec ceux déjà existants [1, 2, 5, 6], nous avons appliqué les différents modèles à certaines études d'extraction rapportées dans la bibliographie [3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

I.3.1. Modélisation des cinétiques d'extraction par hydrodistillation et par les procédés d'hydrodistillation assistés par micro-onde :

- Cinétique d'extraction du thym [4].

Golmakani et Rezaei [4] ont mené une étude comparative d'évolution du rendement d'extraction du thym en fonction du temps par hydrodistillation classique (HD) et par hydrodistillation assistée par micro-ondes (MHD).

- Application des modèles :

Nous avons tenté de simuler les cinétiques d'extraction par hydrodistillation (HD) et par l'hydrodistillation assistée par micro-onde (MHD) du thym par les 4 modèles suivants :

Modèle 1 :
$$y(t) = y_{\infty} \left(\frac{f \times t}{t + b} + (1 - f)(1 - \exp(-Kt)) \right)$$
 Modèle développé.

Modèle 2 :
$$y(t) = y_{\infty} (1 - \exp(-Kt))$$
 modèle de Spiro [5].

Modèle 3 :
$$y(t) = \frac{y_{\infty} * t}{t + b}$$
 modèle de K. Babu [6].

Modèles 4 :
$$y(t) = y_{\infty} (1 - fe^{-k_1 t} - (1 - f)e^{-k_2 t})$$
 modèle de Benyoussef [1] et Sovova [2].

Les points expérimentaux et courbes simulées par les différents modèles sont donnés sur les graphes de la figure I.1.

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

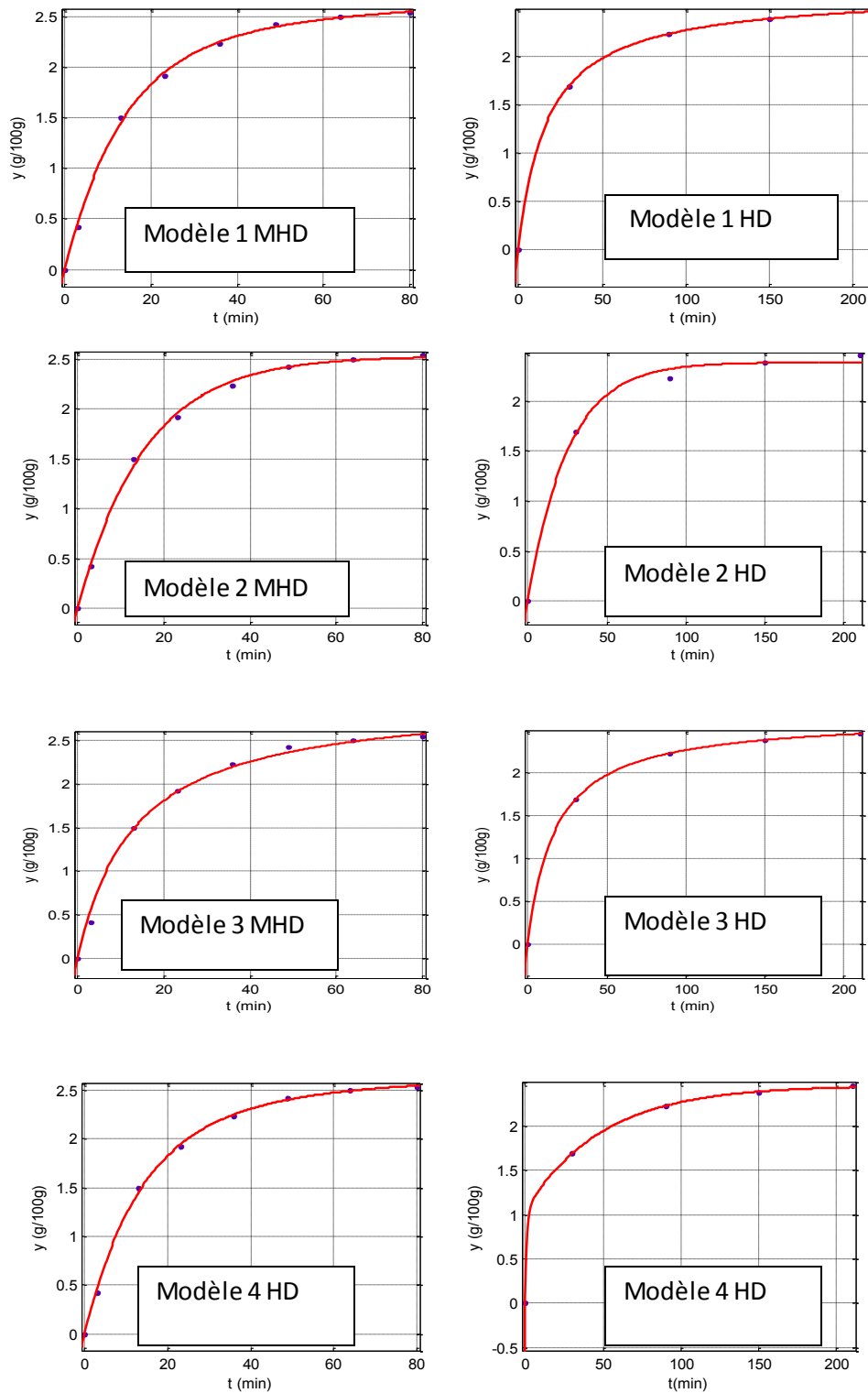


Figure I.1. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de thym par les 4 modèles avec les deux procédés MHD et HD.

Les valeurs des paramètres des modèles sont rassemblées dans le tableau I.1

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

Tableau I.1. Paramètres évalués à l'aide des 4 modèles pour l'huile de thym.

Plantes et procédé d'extraction		(MHD) Thym	(HD) Thym
Modèle 1	y_{∞} (g/100g)	2.97	2.66
	b	41.03	19.12
	f	0.33	0.93
	K (min⁻¹)	0.07	0.12
	R²	0.99	1
Modèle 2	y_{∞} (g/100g)	2.95	2.38
	K (min⁻¹)	0.06	0.05
	R²	0.99	0.99
Modèle 3	y_{∞} (g/100g)	2.99	2.65
	b	13.07	17.23
	R²	0.99	1
Modèle 4	y_{∞} (g/100g)	2.54	2.46
	f	0.60	0.42
	K₁ (min⁻¹)	0.12	0.83
	K₂ (min⁻¹)	0.05	0.02
	R²	0.99	0.99

- **Cinétique d'extraction du romarin [7].**

Bousbia et al [7] ont mené une étude comparative sur l'évolution du rendement d'extraction du romarin en fonction du temps par hydrodistillation (HD) classique et par hydrodiffusion gravitaire assistée par micro-ondes (MHG).

- **Application des modèles :**

Nous avons tenté de simuler les cinétiques d'extraction par hydrodistillation (HD) et par hydrodiffusion gravitaire assistée par micro-ondes (MHG) du romarin par les 4 modèles.

Les valeurs des paramètres des modèles sont rassemblées dans le tableau I.2.

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

Tableau I.2. Paramètres évalués à l'aide des 4 modèles pour l'huile de romarin.

Plantes et procédé d'extraction		(MHG) Romarin	(HD) Romarin
Modèle 1	y_{∞} (g/100g)	0.37	0.49
	b	0.95	115.60
	f	$4.3 \cdot 10^{-3}$	0.55
	K (min⁻¹)	0.30	0.01
	R²	0.99	0.99
Modèle 2	y_{∞} (g/100g)	0.36	0.40
	K (min⁻¹)	0.33	0.01
	R²	0.98	0.99
Modèle 3	y_{∞} (g/100g)	0.38	0.49
	b	3.26	112.90
	R²	0.98	0.99
Modèle 4	y_{∞} (g/100g)	0.34	0.48
	f	0.94	0.60
	K₁ (min⁻¹)	0.38	0.05
	K₂ (min⁻¹)	0.38	0.02
	R²	0.97	0.99

Les points expérimentaux et les courbes simulées par les différents modèles sont donnés sur les graphes de la figure I.2.

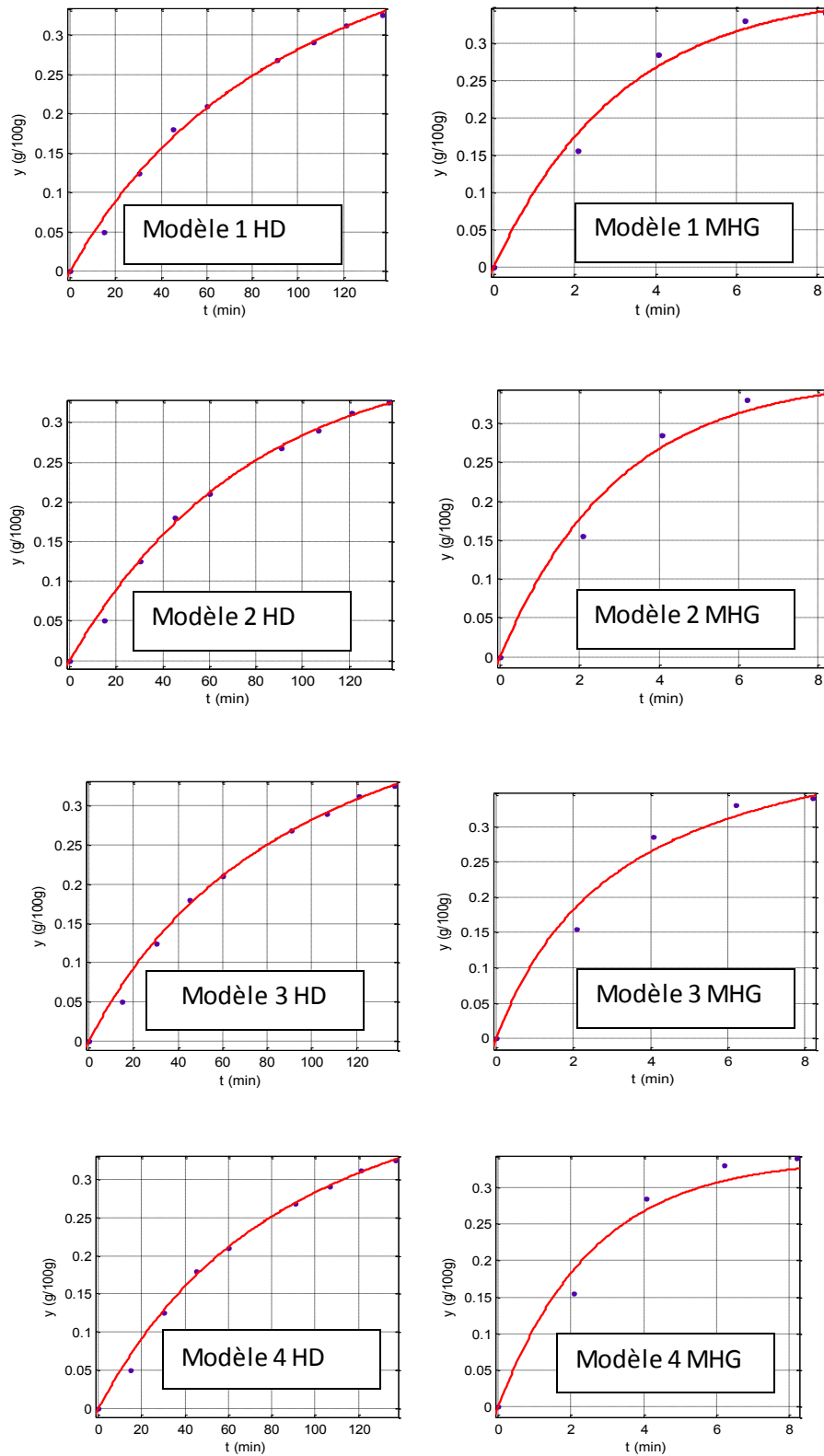


Figure I.2. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de romarin par les 4 modèles avec les deux procédés MHG et HD.

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

- Cinétique d'extraction des fruits du citrus [8].

Farhat et al [8] ont fait une étude comparative sur l'évolution du rendement d'extraction des fruits du Citrus par les deux procédés : l'hydrodistillation classique et la distillation sans solvant assistée par microonde (MAD), leur résultats ont montré que (MAD) est plus efficace que (HD) en terme d'énergie, pollution et rendement.

Application des modèles :

Nous avons tenté de simuler les cinétiques d'extraction par hydrodistillation (HD) et par distillation sans solvant assistée par microonde (MAD) des fruits du citrus par les 4 modèles.

Les valeurs des paramètres des modèles sont rassemblées dans le tableau I.3.

Tableau I.3. Paramètres évalués à l'aide des 4 modèles pour l'huile des fruits du citrus.

Plantes et procédé d'extraction		(MAD) fruits du Citrus	(HD) fruits du Citrus
Modèle 1	y_{∞} (g/100g)	0.38	0.33
	b	9	9.52
	f	0.37	$3.4 \cdot 10^{-3}$
	K (min⁻¹)	0.13	0.06
	R²	0.99	0.91
Modèle 2	y_{∞} (g/100g)	0.33	0.33
	K (min⁻¹)	0.14	0.06
	R²	0.99	0.91
Modèle 3	y_{∞} (g/100g)	0.35	0.33
	b	8.96	19
	R²	0.99	0.90
Modèle 4	y_{∞} (g/100g)	0.33	0.32
	f	0.82	0.83
	K₁ (min⁻¹)	0.14	0.07
	K₂ (min⁻¹)	0.46	0.07
	R²	0.99	0.88

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

Les points expérimentaux et courbes simulées par les différents modèles sont donnés sur les graphes de la figure I.3.

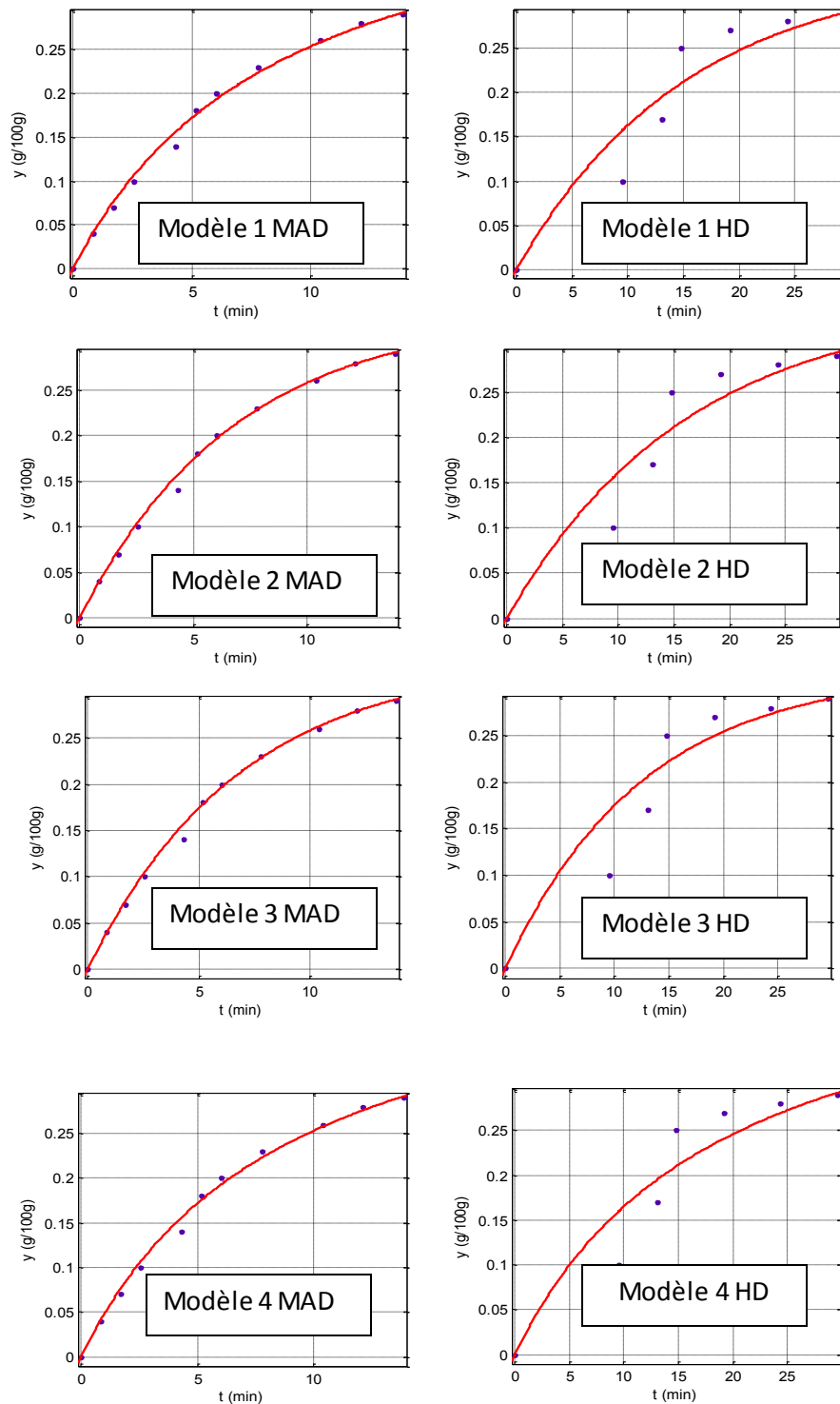


Figure I.3. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de pelures d'agrumes frais par les 4 modèles avec les deux procédés MAD et HD.

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

- Cinétique d'extraction d'arbousier [9].

Benyoussef et Bessah [9] ont mené une étude sur l'évolution du rendement d'extraction de l'arbousier en fonction du temps obtenu par hydrodistillation (HD) classique.

Application des modèles :

Nous avons tenté de simuler les cinétiques d'extraction par hydrodistillation (HD) d'arbousier par les 4 modèles.

Les points expérimentaux et courbes simulées par les différents modèles sont donnés sur les graphes des figures I.4, I.5, I.6, I.7.

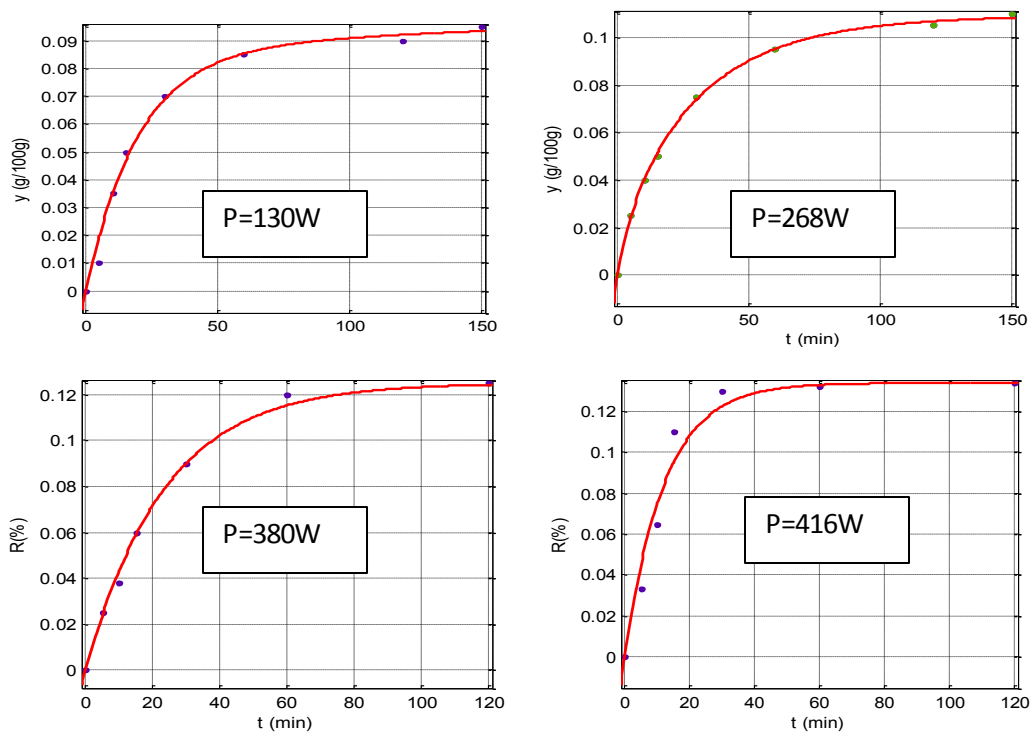


Figure I.4. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier en fonction des différentes puissances par le modèle 1 avec le procédé HD.

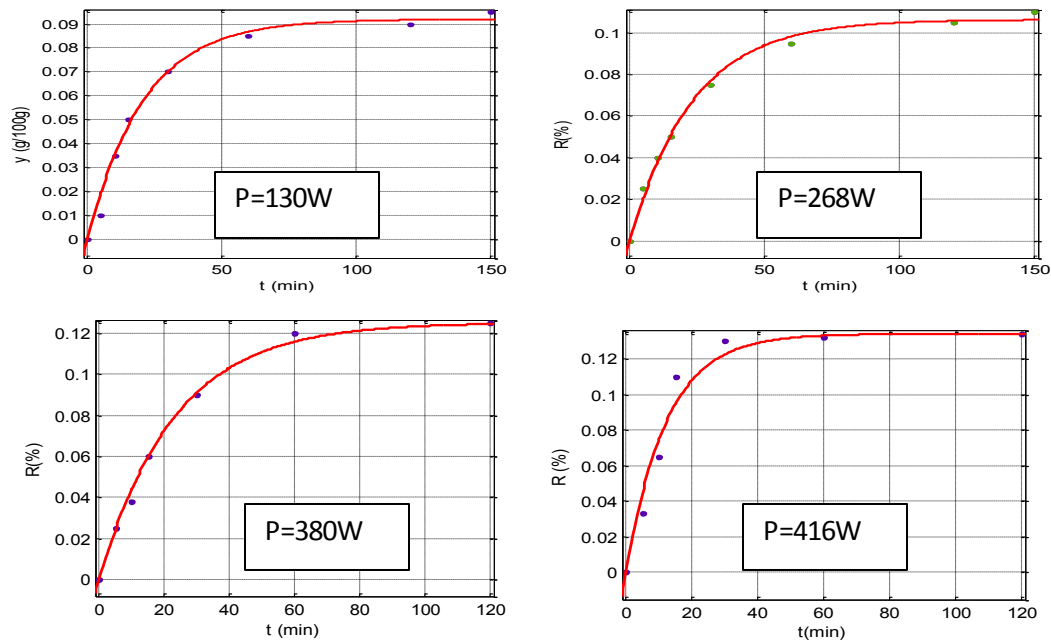


Figure I.5. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier en fonctions des différentes puissances par le modèle 2 avec le procédé HD.

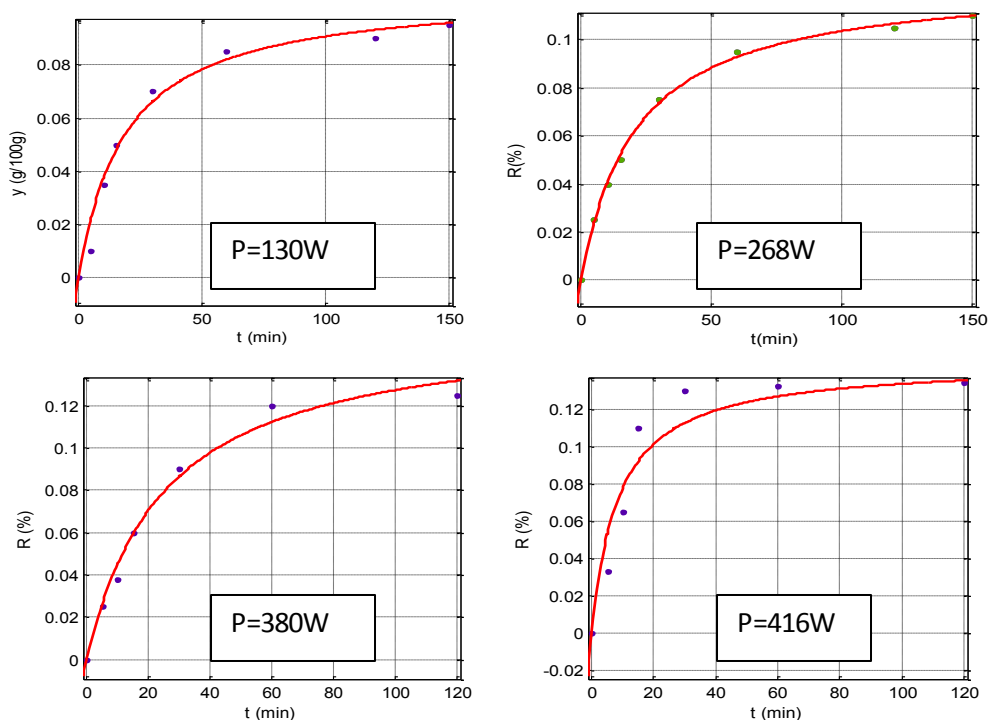


Figure I.6. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier en fonctions des différentes puissances par le modèle 3 avec le procédé HD.

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

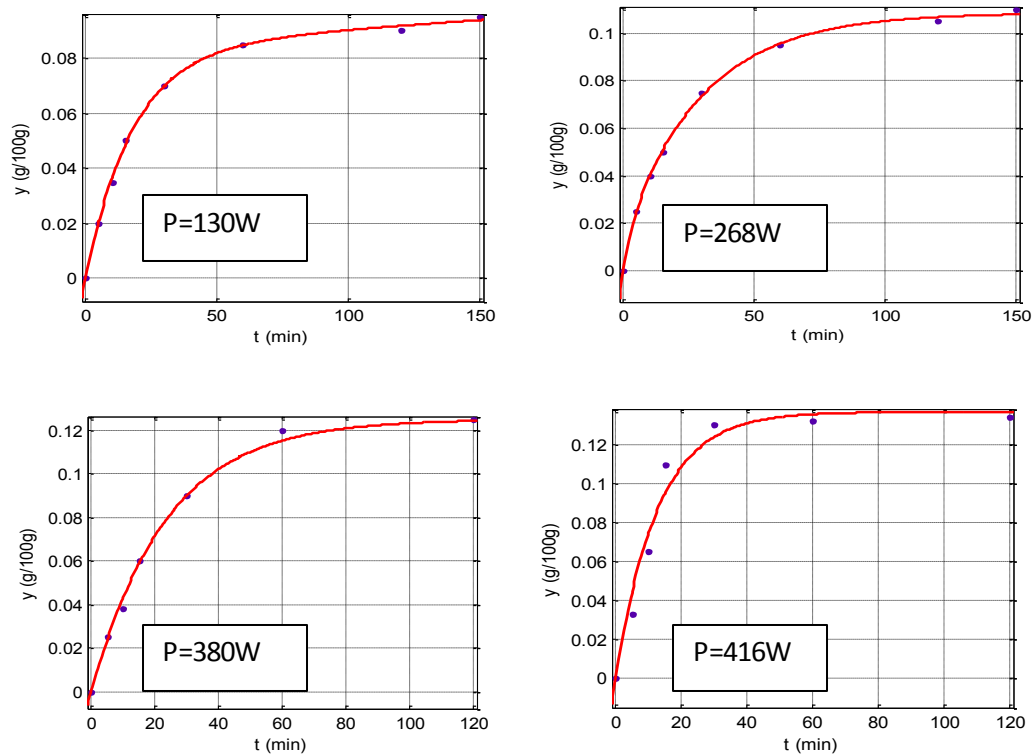


Figure I.7. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier en fonctions des différentes puissances par le modèle 4 avec le procédé HD.

Les valeurs des paramètres des modèles sont rassemblées dans le tableau I.4.

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

Tableau I.4. Les paramètres des 4 modèles proposés pour l'huile essentielle d'arbousier.

Plantes et procédé d'extraction		(HD) Arbousier P=130w	(HD) Arbousier P=268w	(HD) Arbousier P=380w	(HD) Arbousier P=416w
Modèle 1	y_{∞} (g/100g)	0.09	0.11	0.125	0.134
	b	363	7.76	10.39	2.89
	f	0.23	0.30	0.001	1.10^{-7}
	K (min⁻¹)	0.05	0.03	0.04	0.08
	R²	0.98	0.99	0.99	0.97
Modèle 2	y_{∞} (g/100g)	0.09	0.11	0.12	0.13
	K (min⁻¹)	0.04	0.04	0.04	0.08
	R²	0.99	0.99	0.99	0.91
Modèle 3	y_{∞} (g/100g)	0.09	0.11	0.12	0.13
	b	19	20	25.24	8.65
	R²	0.98	0.99	0.98	0.96
Modèle 4	y_{∞} (g/100g)	0.09	0.11	0.13	0.13
	f	0.08	0.87	0.99	0.99
	K₁ (min⁻¹)	0.04	0.33	0.03	0.07
	K₂ (min⁻¹)	0.04	0.27	0.99	0.07
	R²	0.98	0.99	0.99	0.96

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

- Cinétique d'extraction de genévrier [3] :

Milojevic et al [3] ont étudié l'influence de la vitesse d'hydrodistillation et du ratio matière végétale-eau sur le rendement en huile essentielle des baies de genévrier en établissant différentes cinétiques d'extraction.

Les différents débits d'hydrodistillation ont été obtenus par variation de la puissance de chauffage.

- Application des modèles :

Nous avons tenté de simuler les cinétiques d'extraction par hydrodistillation (HD) des baies de genévrier par les 4 modèles.

Les points expérimentaux et courbes simulées par les différents modèles sont donnés sur les graphes de ces figures I.8, I.9, I.10, I.11.

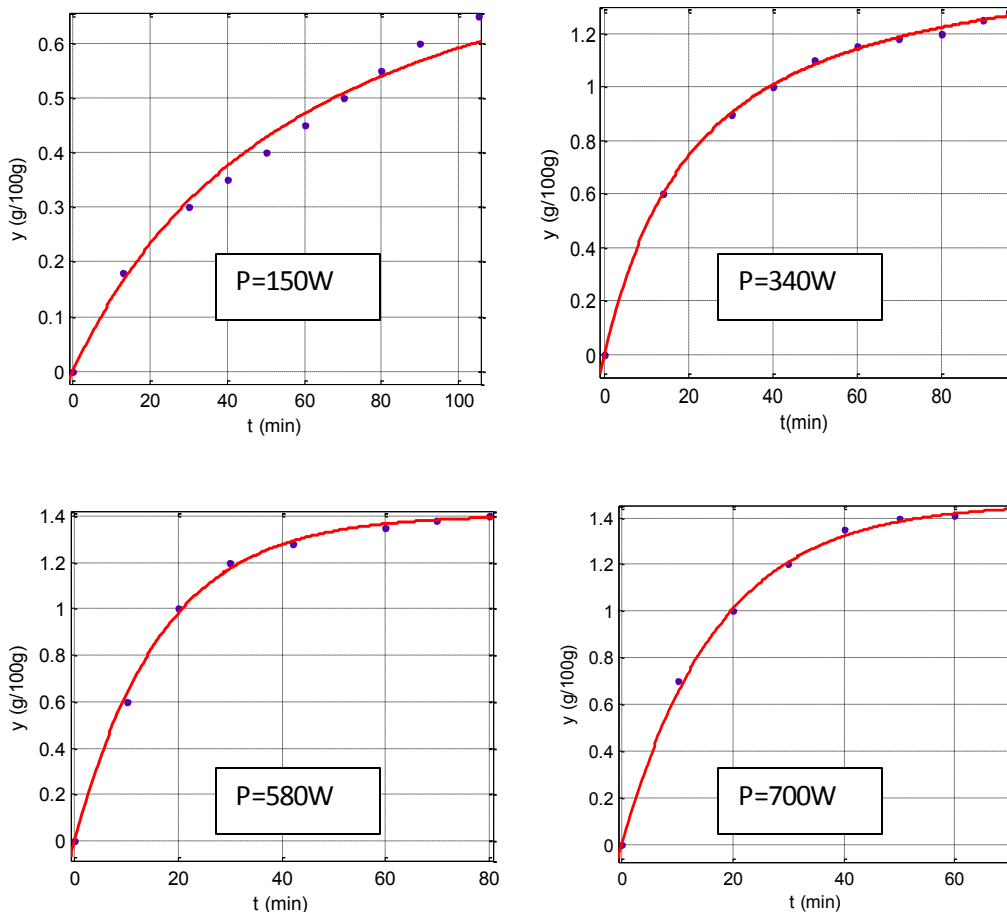


Figure I.8. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de genévrier en fonctions des différentes puissances par le modèle 1 avec le procédé HD.

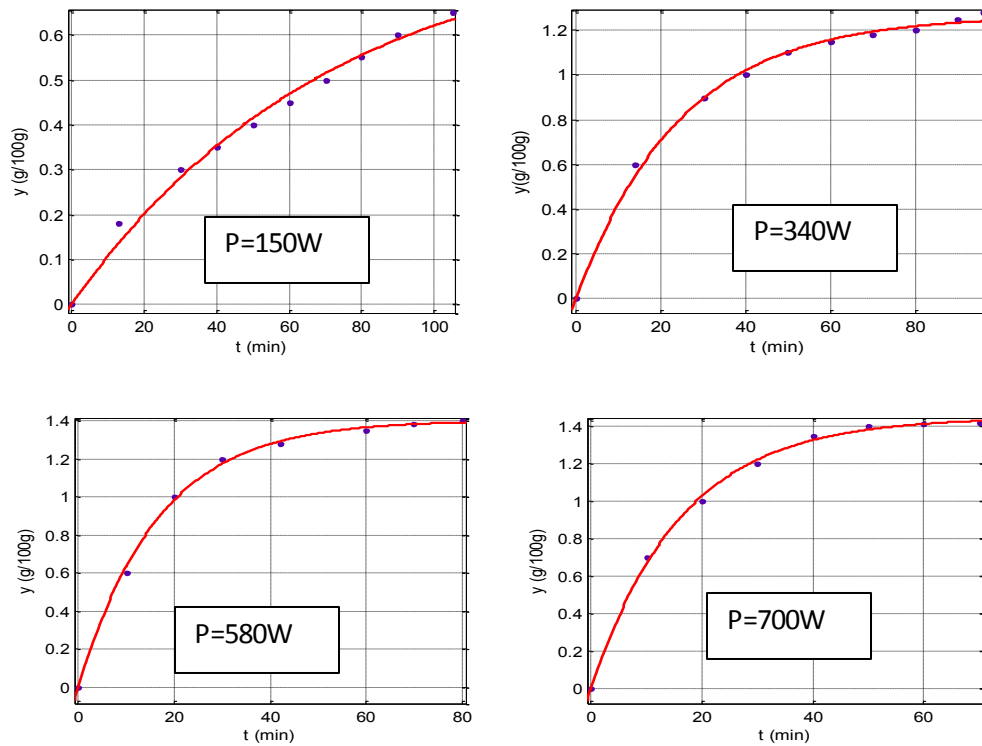


Figure I.9. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de genévrier en fonctions des différentes puissances par le modèle 2 avec le procédé HD.

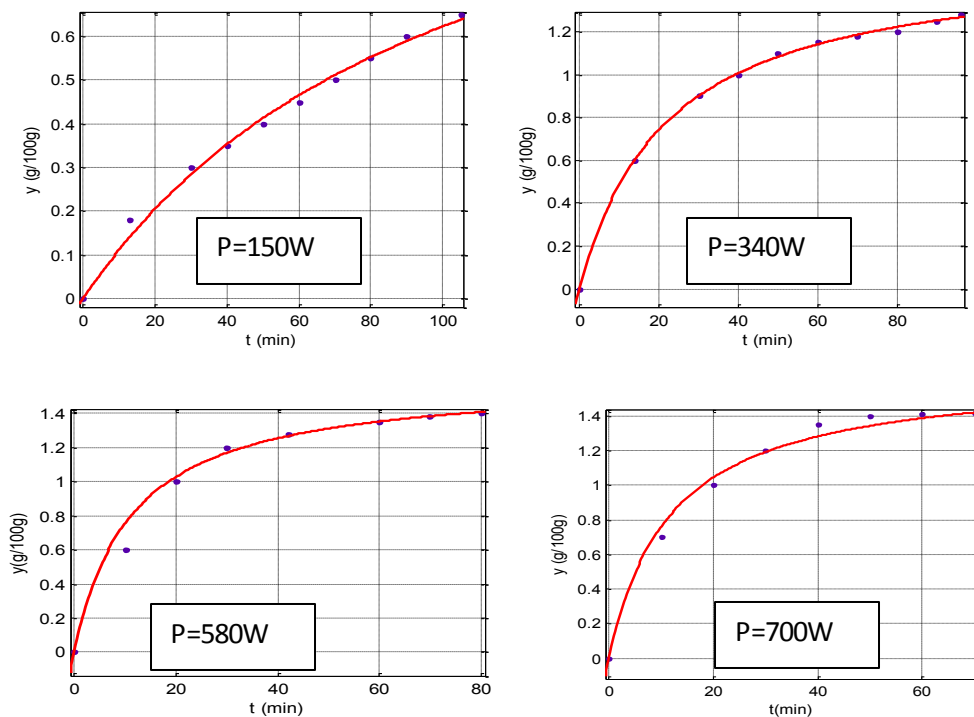


Figure I.10. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de genévrier en fonctions des différentes puissances par le modèle 3 avec le procédé HD.

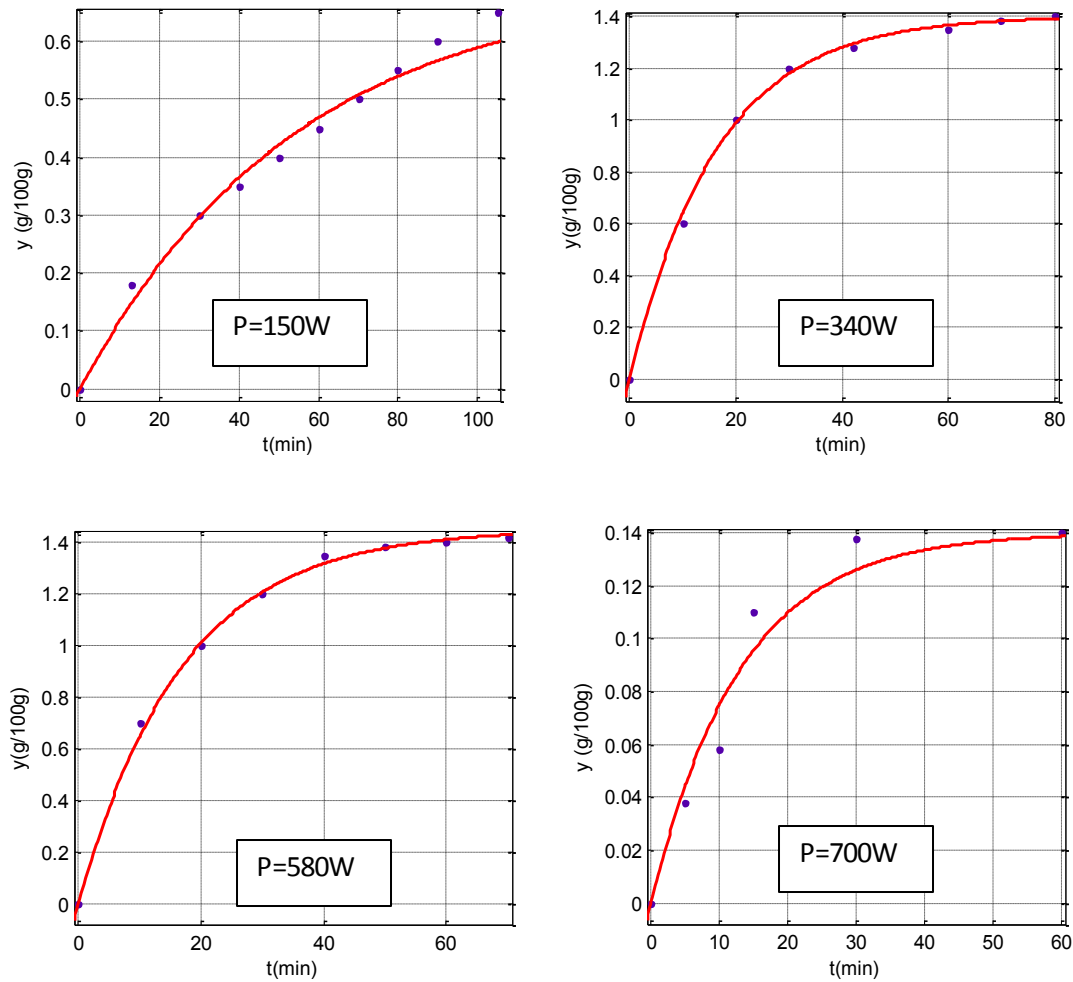


Figure I.11. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de genévrier en fonctions des différentes puissances par le modèle 4 avec le procédé HD.

Les valeurs des paramètres des modèles sont rassemblées dans le tableau I.5.

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

Tableau I.5. Les paramètres des 4 modèles proposés pour l'huile essentielle d'genévrier.

Plantes et procédé d'extraction		(HD) Arbousier P=150w	(HD) Arbousier P=340w	(HD) Arbousier P=580w	(HD) Arbousier P=700w
Modèle 1	y_{∞} (g/100g)	0.82	1.3	1.4	1.44
	b	62	22.6	11.65	11.77
	f	1	0.95	0.05	$1.3 \cdot 10^{-9}$
	K (min ⁻¹)	1	0.06	0.06	0.05
	R²	0.98	0.99	0.99	0.99
Modèle 2	y_{∞} (g/100g)	0.82	1.3	1.4	1.44
	K (min ⁻¹)	0.01	0.04	0.06	0.06
	R²	0.99	0.98	0.99	0.99
Modèle 3	y_{∞} (g/100g)	0.82	1.3	1.4	1.44
	b	103	22	11.65	11.77
	R²	0.99	0.99	0.99	0.99
Modèle 4	y_{∞} (g/100g)	0.7	1.32	1.4	1.43
	f	$2.18 \cdot 10^{-9}$	0.75	0.76	1
	K₁ (min ⁻¹)	1	0.02	0.41	0.05
	K₂ (min ⁻¹)	0.01	0.24	0.05	1
	R²	0.97	0.99	0.99	0.99

🔗 Interprétation des résultats :

Afin de valider notre approche de modélisation, il nous a semblé impératif de comparer les résultats donnés par les modèles tenant compte que de la diffusion dans le solide (modèle 2), les équations ne considérant qu'un simple équilibre entre phases (modèle 3), le modèle que nous proposons et qui est une combinaison linéaire des deux équations précédentes et enfin les modèles à plus d'une constante de temps

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

et traduisant des cinétiques parallèles (modèle 4) comme rapporté par Benyousef [1] et de Sovova[2].

On constate que les modèles traduisent bien les résultats de MHD, MHG et MAD ainsi que HD réalisés à partir des travaux cités en références [3, 4, 7, 8 ,9]. On note que les quatre approches de modélisation conduisent tous à de bons résultats.

Cependant, dans le modèle que nous proposons, le paramètre f est censé représenter la fraction de l'huile essentielle facilement extractible obtenue à partir des sites superficiels. Alors que les résultats de la simulation montrent des valeurs de ce paramètre plus faibles dans les procédés assistés par micro-ondes que dans les procédés sans micro-ondes. Ce résultat vient fragiliser la structure du modèle du fait que les valeurs trouvées pour le paramètre f et en contradiction avec le sens physique que nous lui avons donné les observations microscopiques. En effet, après traitement du substrat végétal par un procédé assisté par micro-ondes, il a été montré une destruction quasi-totale des structures cellulaires et qui devrait correspondre à des valeurs de f voisines de l'unité.

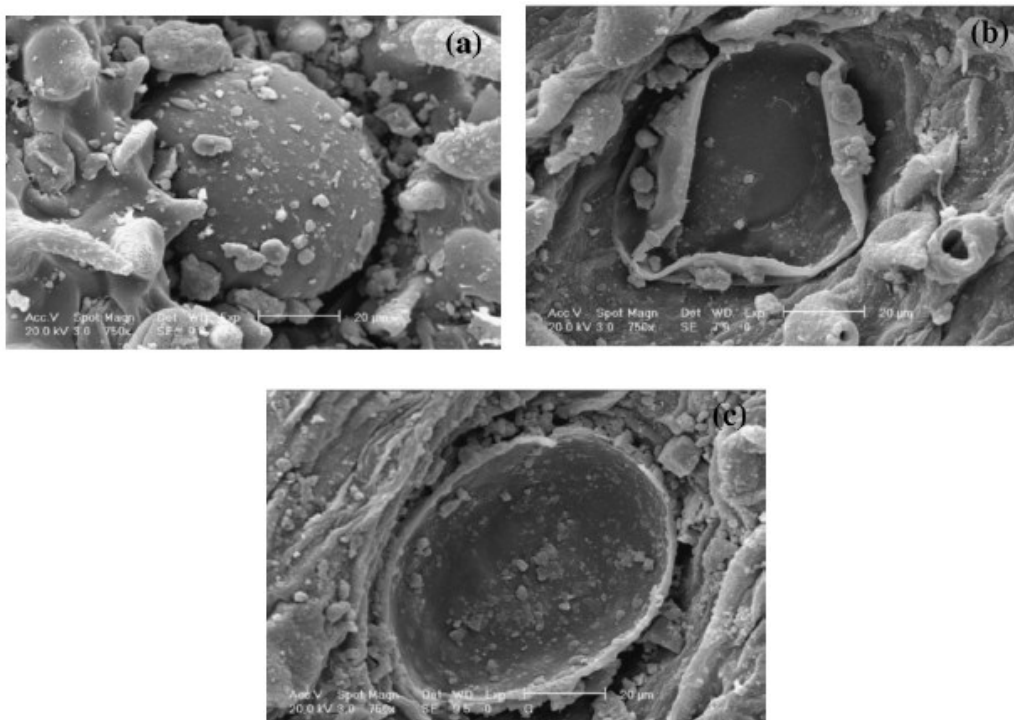


Figure I.12. Photos microscopiques des feuilles du thym : (a) n'est pas traitée, (b) après hydrodistillation pendant 60 min et (c) après l'hydrodistillation assistée par micro-ondes pendant 30 min [4].

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

I.3.2. Application des modèles sur les résultats d'extraction par hydrodiffusion et hydrodiffusion assisté par micro-onde :

- Cinétiques d'extraction de zeste d'orange [10].

Farhat et al. [10] ont effectué une étude comparative entre le rendement d'extraction de zeste d'orange par hydrodiffusion (SDF) classique et par hydrodiffusion assistée par micro-ondes (MSDF). Avec un débit massique de vapeur de 25 g / min et une puissance micro-ondes de 200 W.

✚ Application des modèles :

Nous avons tenté de simuler les cinétiques d'extraction par hydrodiffusion (SDF) et par hydrodiffusion assistée par micro-ondes (MSDF) du zeste d'orange par les 4 modèles.

Les valeurs des paramètres des modèles sont rassemblées dans le tableau I.6.

Tableau I.6. Paramètres évalués à l'aide des 3 modèles pour l'huile de zeste d'orange.

Plantes et procédé d'extraction		(MSDF) zeste d'orange	(SDF) zeste d'orange
Modèle 1	y_{∞} (g/100g)	1.55	1.5
	B	5.50	61.73
	F	0.29	0.43
	K (min⁻¹)	0.22	0.08
	R²	0.99	0.99
Modèle 2	y_{∞} (g/100g)	1.55	1.5
	K (min⁻¹)	0.21	0.06
	R²	0.99	0.99
Modèle 3	y_{∞} (g/100g)	1.55	1.5
	B	4.94	17.52
	R²	0.99	0.99
Modèle 4	y_{∞} (g/100g)	1.68	1.5
	F	0.96	0.54
	K₁ (min⁻¹)	0.293	0.09
	K₂ (min⁻¹)	1	0.01
	R²	0.99	0.99

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

Les points expérimentaux et courbes simulées par les différents modèles sont donnés sur les graphes de la figure I.13.

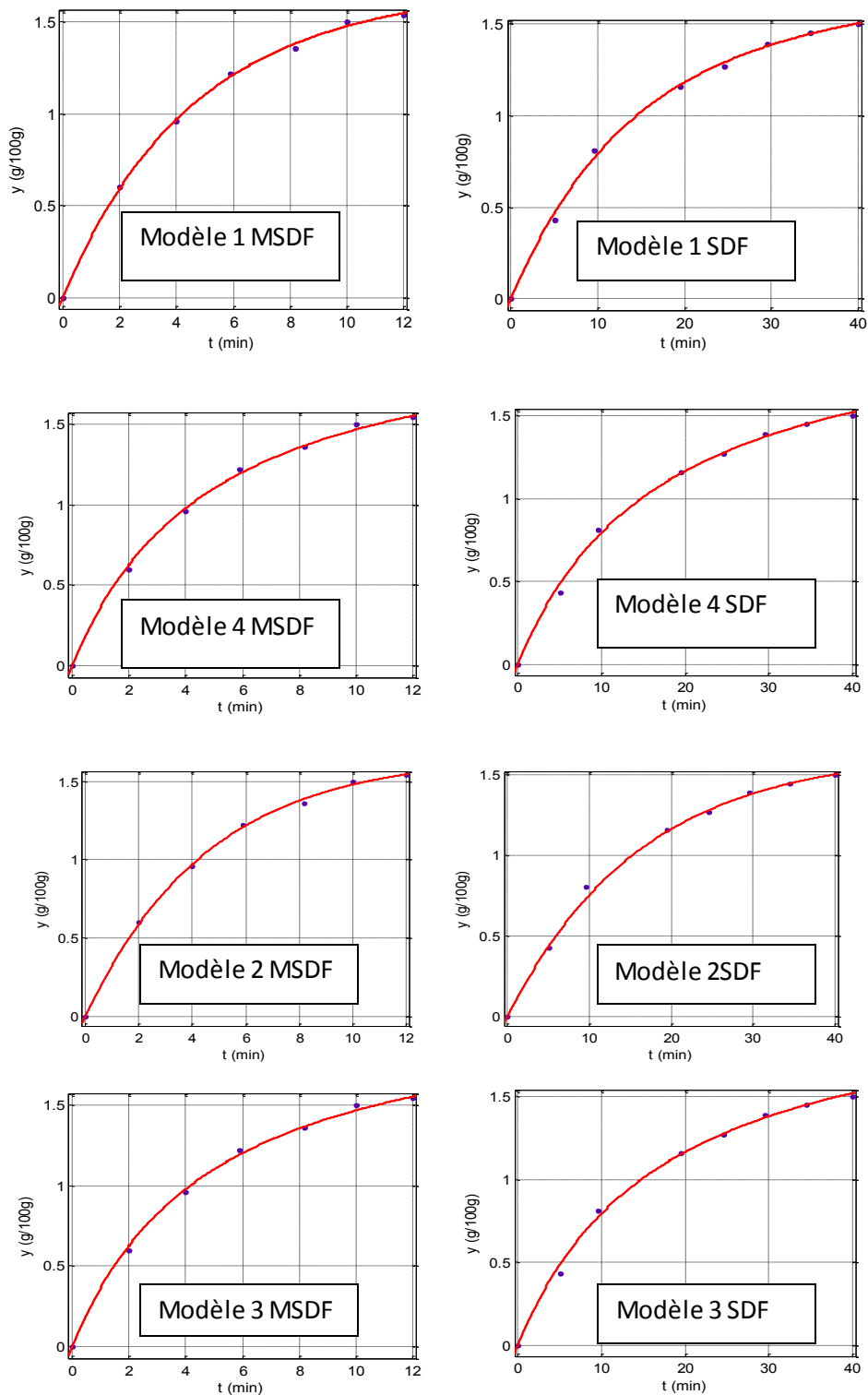


Figure I.13. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle du zeste d'orange par les 4 modèles avec les deux procédés MSDF et SDF.

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

- Cinétique d'extraction de la lavande [11].

Farhat et al. [11] ont aussi appliqué le procédé d'hydrodiffusion assisté par micro-ondes (MSDF) et hydrodiffusion classique (SDF) à l'extraction des fleurs de lavande séchées. Afin d'atteindre une extraction la plus complète que possible en un temps réduit, ces auteurs ont utilisé un débit de vapeur de 25 g/min avec une puissance de micro-ondes $P=200W$.

✚ Application des modèles :

Nous avons tenté de simuler les cinétiques d'extraction par hydrodiffusion (SDF) et par hydrodiffusion assistée par micro-ondes (MSDF) de la lavande par les 4 modèles. Les valeurs des paramètres des modèles sont rassemblées dans le tableau I.7.

Tableau I.7. Paramètres évalués à l'aide des 3 modèles pour l'huile de la lavande.

Plantes et procédé d'extraction		SDF Lavande G=25g/min	MSDF Lavande P=50 w	MSDF Lavande P=100 w	MSDF Lavande P=200, 300,400 w
Modèle 1	y_{∞} (g/100g)	4.5	4.6	4.9	4.8
	b	5	3945	0.05	2.89
	f	$2.63.10^{-11}$	0.004	$2.51.10^{-5}$	$5.31.10^{-5}$
	K (min⁻¹)	0.23	0.85	0.73	0.79
	R²	0.97	0.97	0.97	0.99
Modèle 2	y_{∞} (g/100g)	4.59	4.6	4.9	4.8
	K (min⁻¹)	0.23	0.67	0.75	0.79
	R²	0.97	0.99	0.98	0.99
Modèle 3	y_{∞} (g/100g)	4.59	4.6	4.9	4.8
	b	3.52	94	1.4	1.81
	R²	0.94	0.97	0.96	0.96
Modèle 4	y_{∞} (g/100g)	4.59	4.6	4.41	4.9
	f	$9.74.10^{-14}$	0.15	0.22	0.63
	K₁ (min⁻¹)	0.99	0.87	0.85	0.50
	K₂ (min⁻¹)	0.25	0.87	0.85	0.50
	R²	0.97	0.97	0.92	0.97

Les points expérimentaux et courbes simulées par les différents modèles sont donnés sur les graphes des figures suivantes :

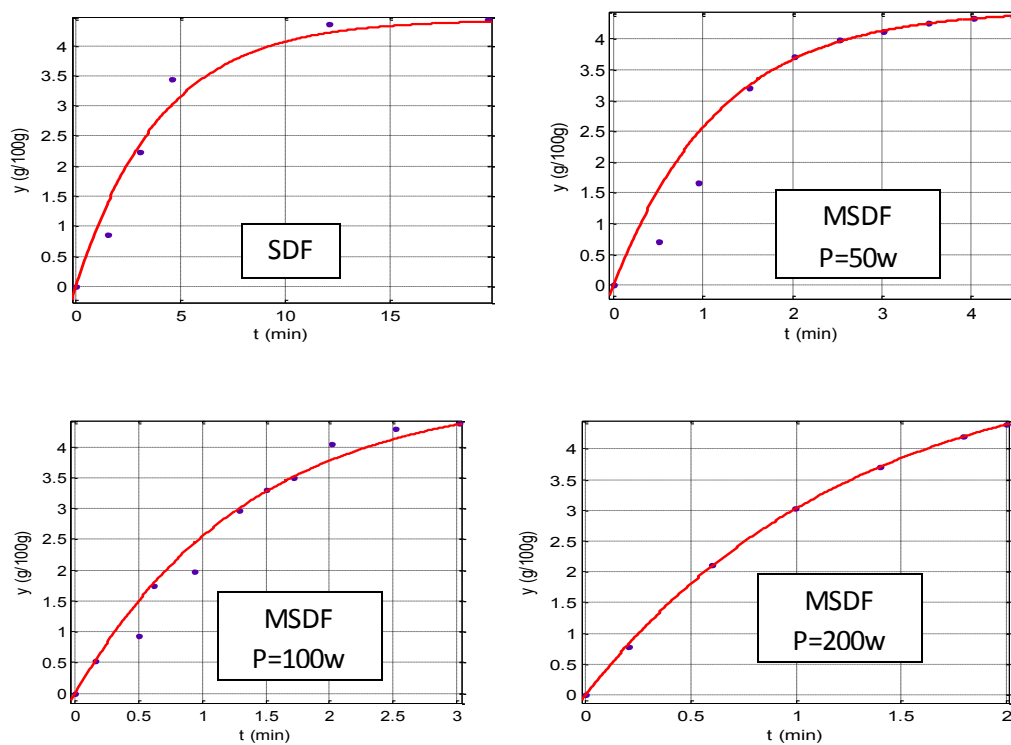


Figure I.14. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par le modèle 1 du les procédés (MSDF, SDF).

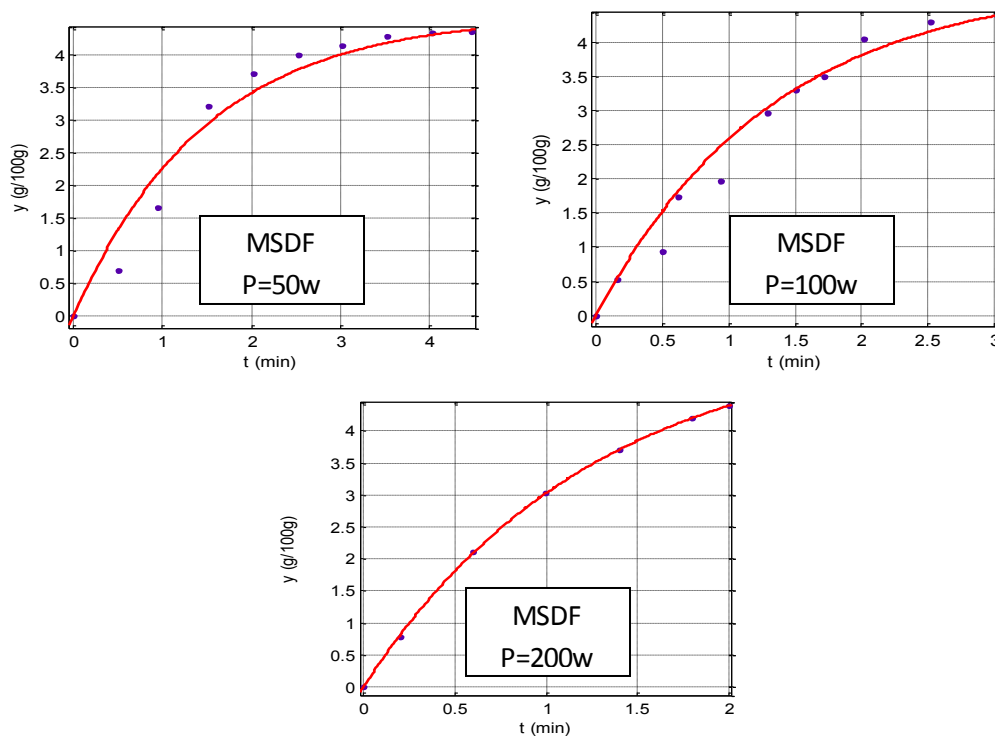


Figure I.15. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par le modèle 2 avec le procédé (MSDF).

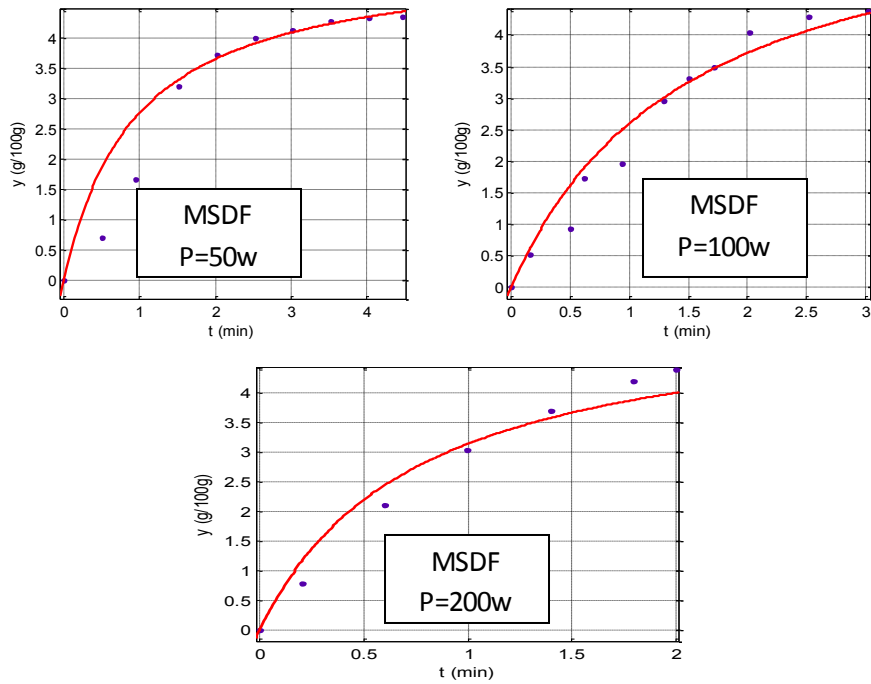


Figure I.16. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par le modèle 3 avec le procédé (MSDF).

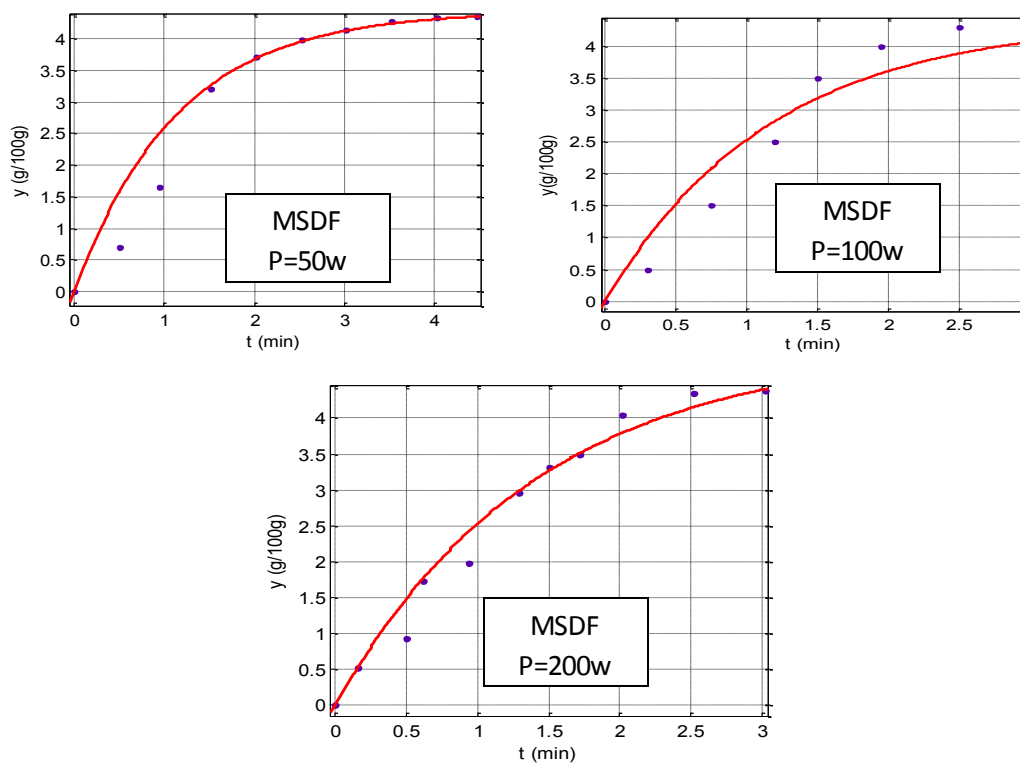


Figure I.17. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par le modèle 4 avec le procédé (MSDF).

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

✚ Interprétation des résultats :

L'examen des différentes courbes simulées montre que le modèle permet une bonne description du comportement du système dans les différentes conditions opératoires. Mais comme dans le cas de l'hydrodistillation, le paramètre f censé représenter la fraction de l'huile essentielle facilement extractible obtenue à partir des sites superficiels, est plus faible dans le cas des micro-ondes que dans le procédé sans micro-ondes. Ce résultat vient encore fragiliser la structure du modèle du fait que les valeurs obtenues du paramètre f sont en contradiction avec le sens physique que nous lui avons donné et avec les observations microscopiques.

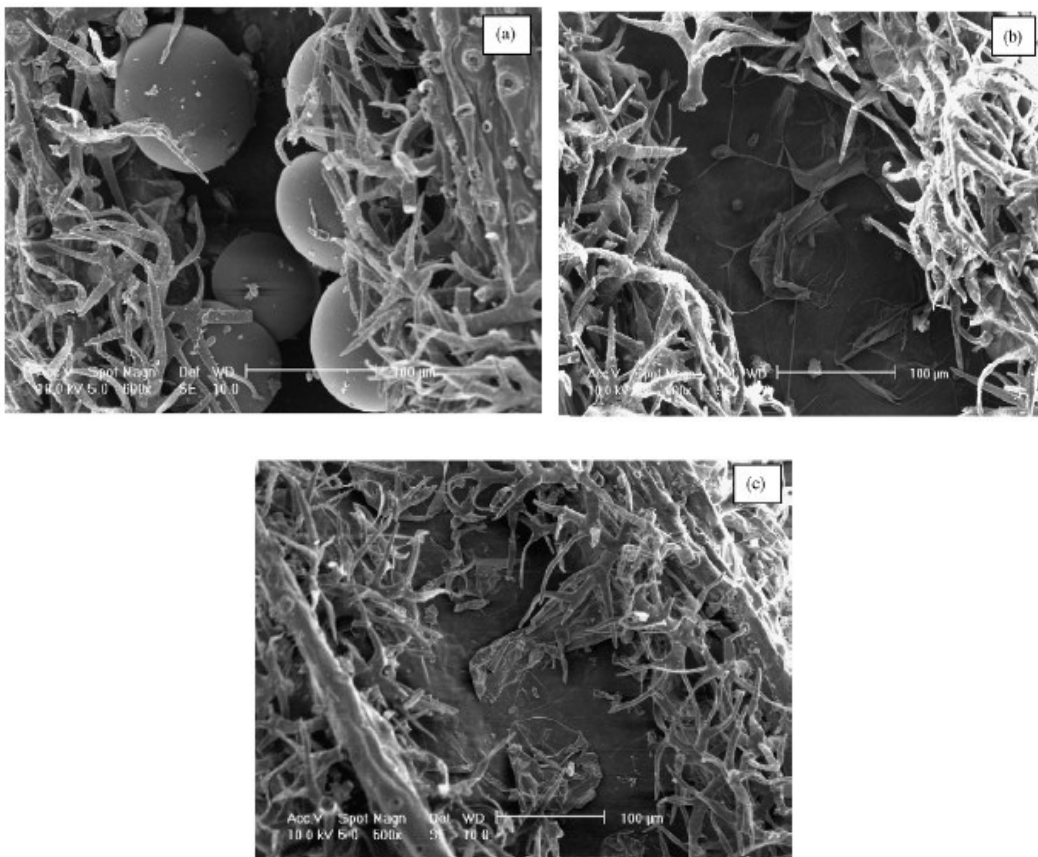


Figure I.18. Photos microscopiques montrant la morphologie des trichomes de la lavande, avant (a), après l'extraction SDF (b) et après l'extraction MSDF (c) [11].

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

I.3.3. Application des modèles sur les résultats d'extraction par le fluide supercritique (SFE) :

- Cinétique d'extraction de la lavande [12].

Sovová [12] a tenté de modéliser les cinétiques d'extraction par fluide supercritique (SFE) à partir de différents substrats végétaux. Ce travail présente une équation simple pour décrire quatre étapes cinétiques chacune caractérisée sa durée et qui sont : la diffusion interne, le transfert de matière externe, l'hypothétique équilibre interfacial sans la résistance au transfert de matière, et l'écoulement de la solution à partir de l'extracteur.

✚ Application du modèle :

Nous avons appliqué les quatre modèles aux cinétiques d'extraction par le fluide supercritique (SFE) de la lavande [13].

Les valeurs des paramètres des modèles sont rassemblées dans le tableau I.8.

Tableau III.8. Paramètres évalués à l'aide des 4 modèles pour l'huile de la lavande.

Plantes et procédé d'extraction		(SFE) Lavande T=35°C	(SFE) Lavande T= 40°C	(SFE) Lavande T= 50°C
Modèle 1	y_{∞} (g/100g)	0.019	0.015	0.012
	b	103.4	100.2	2.69
	f	0.93	0.66	0.49
	K (min⁻¹)	0.61	0.07	0.032
	R²	0.98	0.99	0.98
Modèle 2	y_{∞} (g/100g)	0.01	0.01	0.01
	K (min⁻¹)	0.01	0.03	0.05
	R²	0.97	0.99	0.97
Modèle 3	y_{∞} (g/100g)	0.01	0.01	0.01
	b	53.23	25.78	11.68
	R²	0.95	0.99	0.99
Modèle 4	y_{∞} (g/100g)	0.01	0.012	0.01
	f	0.23	0.65	0.69
	K₁ (min⁻¹)	1	0.01	0.03
	K₂ (min⁻¹)	0.01	0.64	0.74
	R²	0.95	0.99	0.98

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

Les points expérimentaux et courbes simulées par les différents modèles sont donnés sur les graphes des figures ci-dessous.

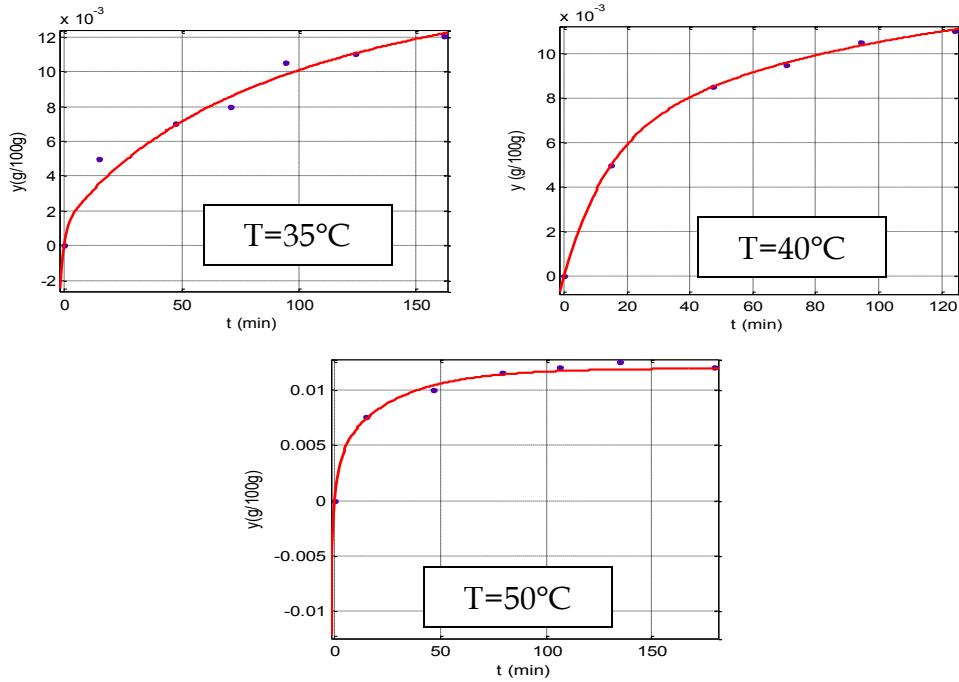


Figure I.19. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par le modèle 1 avec le procédé SFE.

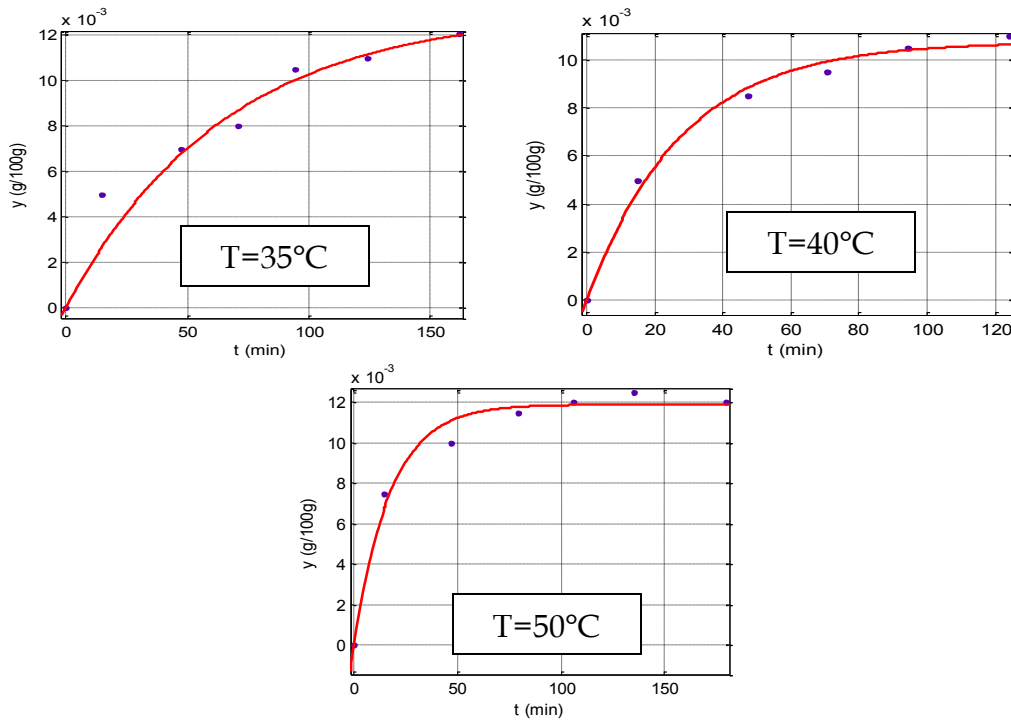


Figure I.20. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par le modèle 2 avec le procédé SFE.

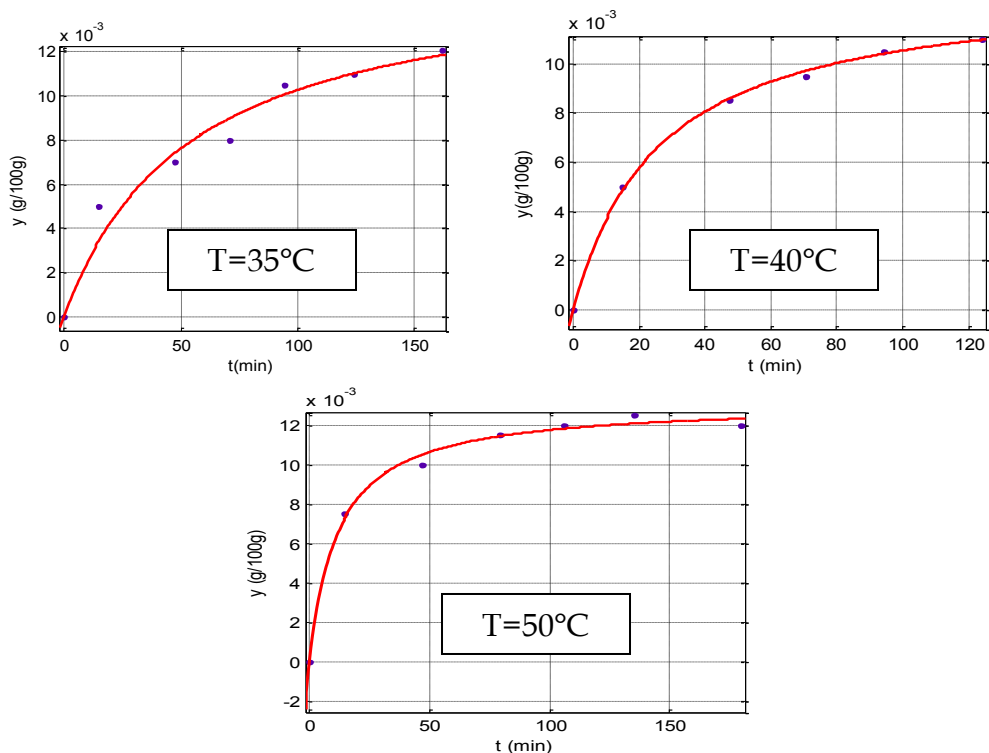


Figure I.21. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par le modèle 3 avec le procédé SFE.

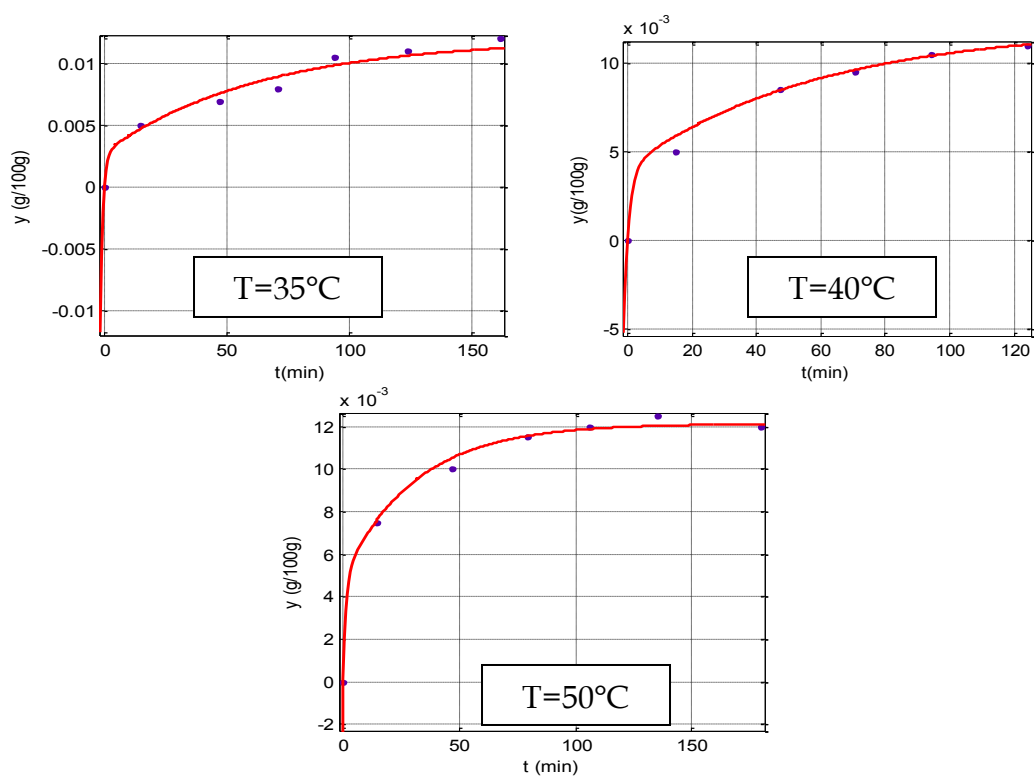


Figure I.22. Simulation de la cinétique d'extraction de l'huile essentielle de lavande par le modèle 4 avec le procédé SFE.

Chapitre I : Modélisation du transfert de matière et application.

✚ Interprétation des résultats :

L'examen des courbes représentées sur les figures ci-dessus, montre que les modèles permettent de donner un très bon ajustement des courbes cinétiques.

Notons que dans le modèle 1 le paramètre f correspondant à la fraction de l'huile essentielle facilement extractible obtenue à partir des sites superficiels n'est pas significatif car on a trouvé que sa valeur dans le procédé SFE à $T=50\text{ °C}$ plus faible que celle de procédé d'extraction SFE à $T=35\text{ °C}$ ce qui ne pourrait avoir de justifications.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons essayé de formuler un modèle mathématique à quatre paramètres qui permet de décrire l'extraction des huiles essentielles par hydrodistillation en considérant qu'une partie de l'huile est facilement extractible, déposée sur la surface de la matière végétale, alors que l'autre partie est située dans des cellules intactes à l'intérieur du solide.

Le modèle établi est présenté sous la forme de la somme de deux termes, le premier terme décrit l'extraction de l'huile superficielle et basé sur les lois d'équilibre, alors que le second terme exponentiel correspond à la diffusion lente de l'huile à partir des cellules internes.

Malgré la bonne simulation de l'ensemble des cinétiques considérées par notre approche, nous ne pouvons classer l'équation obtenue comme modèle en l'absence de validation par signification physique cohérente de ses paramètres. Au plus, nous pouvons dire que nous avons élaboré une corrélation qui traduit l'évolution du rendement en fonction de la durée de traitement.

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors de l'extraction des huiles essentielles

Les procédés d'extraction demandent une consommation énergétique considérable pour avoir un rendement relativement plus élevés.

Dans ce chapitre, nous présenterons la démarche adoptée pour modéliser et optimiser la consommation énergétique lors de l'extraction par différentes méthodes sur divers plant

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

II.1. simulation des vitesses d'extraction :

La vitesse d'extraction représente la quantité d'huile essentielle extraite par unité de masse de matière végétale et par unité de temps, elle est donnée par l'expression suivante :

$$v = dy/dt \quad (II.1)$$

Nous avons envisagé de modéliser l'évolution de la vitesse d'extraction en fonction du temps par dérivation des équations des quatre modèles utilisés dans le chapitre précédent.

- **Simulation par le modèle 1 :**

$y(t)$ est donné par l'expression suivante :

$$y(t) = y_{\infty} \left(\frac{f \times t}{t+b} + (1-f)(1 - \exp(-Kt)) \right) \quad (II.2)$$

On obtient :

$$v(t) = y_{\infty} \left(\frac{f \cdot b}{(t+b)^2} + K \cdot (1-f) \cdot \exp(-K \cdot t) \right) \quad (II.3)$$

- **Simulation par le modèle 2 [5] :**

$y(t)$ est donné par l'expression suivante :

$$y(t) = y_{\infty} (1 - \exp(-Kt)) \quad (II.4)$$

On obtient $v(t) = y_{\infty} \cdot K \cdot \exp(-Kt)$ (II.5)

- **Simulation par le modèle 3 [6] :**

$y(t)$ est donné par l'expression suivante :

$$y(t) = \frac{y_{\infty} \cdot t}{t+b} \quad (II.6)$$

On obtient : $v(t) = y_{\infty} \cdot \left(\frac{b}{(t+b)^2} \right)$ (II.7)

- **Simulation par le modèle 4 [1-2] :**

$y(t)$ est donné par l'expression suivante :

$$y(t) = y_{\infty} (1 - fe^{-k_1 t} - (1-f)e^{-k_2 t}) \quad (II.8)$$

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

On obtient $v(t) = y_{\infty} (f * k_1 * e^{-k_1 t} + (1 - f) * k_2 * e^{-k_2 t})$ (II.9)

II.1.1. Influence de la puissance sur la vitesse d'extraction par hydrodistillation :

Dans un premier temps nous avons tenté d'examiner l'influence de la puissance utilisée sur la vitesse d'extraction par hydrodistillation (HD). Cette influence a été étudiée dans le cas de l'hydrodistillation de l'arbousier [9] et des baies de genévrier [3]. Les évolutions des vitesses obtenues par dérivation des quatre équations de modèles pour les deux espèces végétales sont données par les courbes des figures II.1 et II.2

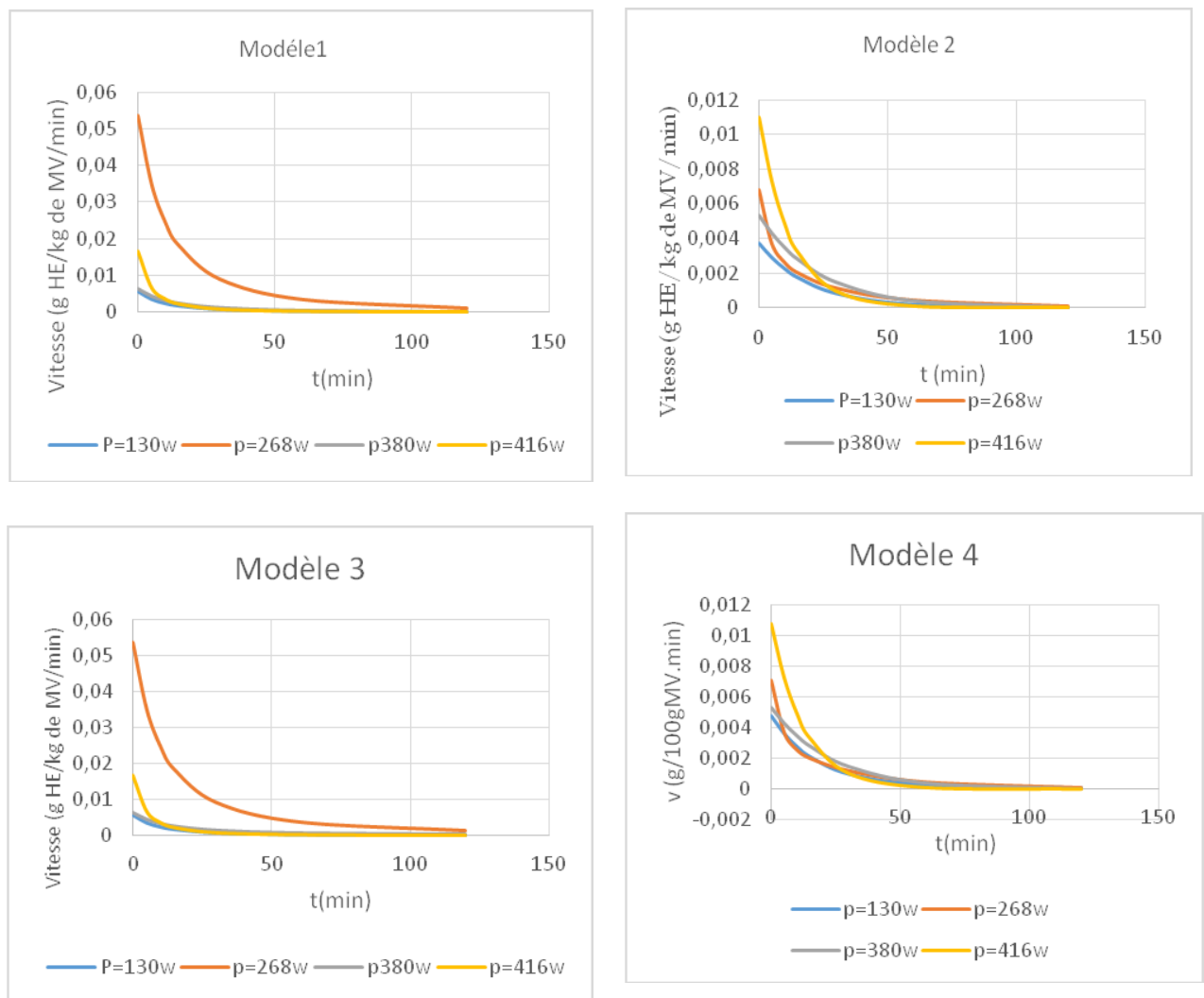


Figure II.1 : l'évolution de la vitesse d'extraction de l'huile essentielle d'arbousier en fonction du temps sous les différentes puissances de chauffe, simulée par les 4 modèles (procédé d'extraction HD).

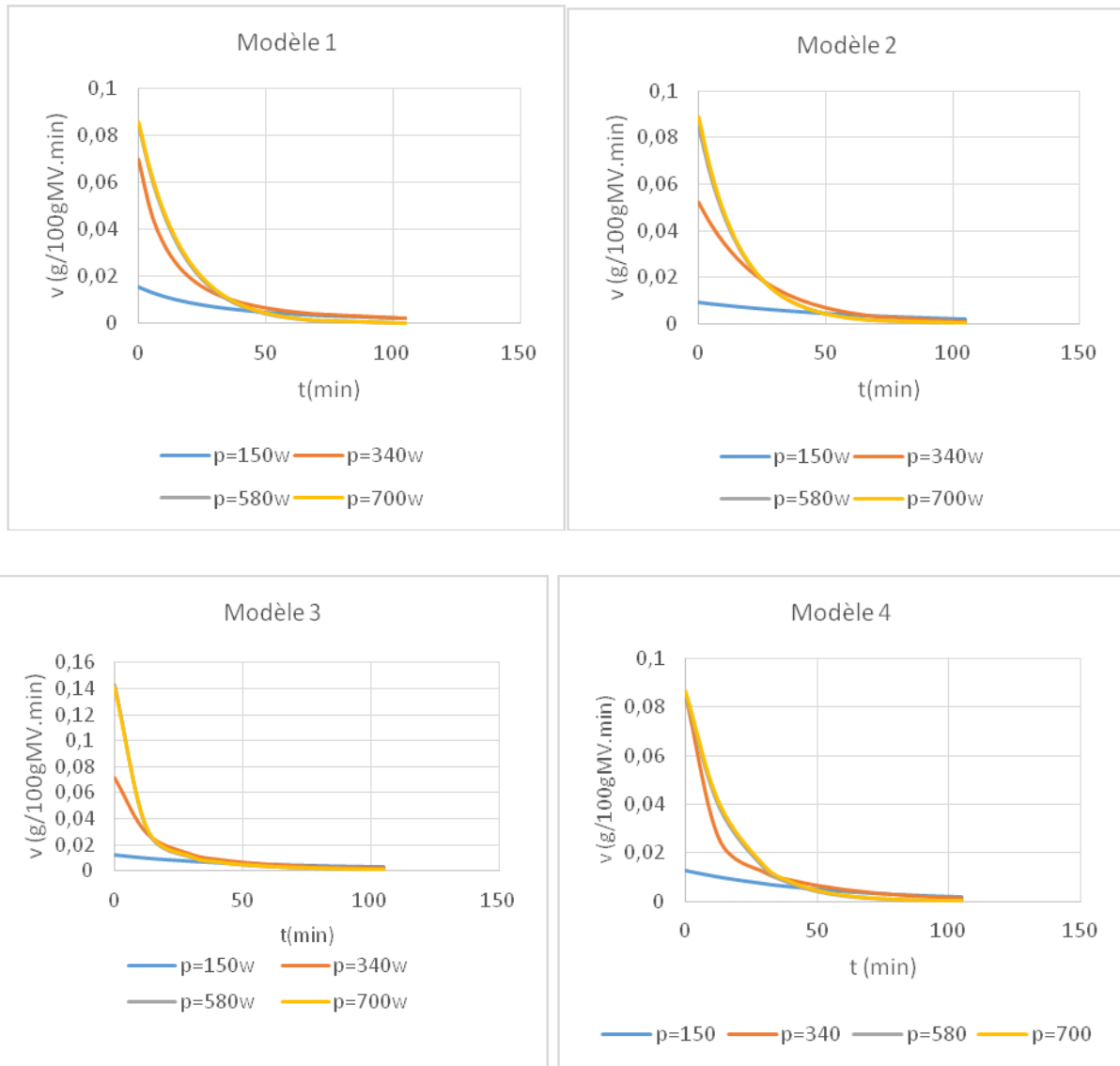


Figure II.2 : L'évolution de la vitesse d'extraction de l'huile essentielle de genévrier en fonction du temps sous les différentes puissances de chauffe, simulée par les 4 modèles (procédé d'extraction HD).

✚ Interprétation des résultats :

L'examen de ces courbes montre que la puissance de chauffage contribue à une augmentation considérable de la vitesse initiale d'extraction jusqu'à atteindre une valeur limite à partir de laquelle la puissance de chauffe n'a pas d'influence significative sur la cinétique d'extraction. Cette valeur limite peut alors être considérée comme puissance optimale.

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

II.1.2. Influence de la puissance sur la vitesse d'extraction par hydrodiffusion :

Nous avons étudié dans cette partie l'influence de la puissance de chauffage sur la vitesse d'extraction dans le cas du traitement de la lavande par hydrodiffusion (SDF) [11]. Les évolutions des vitesses d'extraction obtenues par dérivation des équations des quatre modèles développés précédemment sont représentées sur les graphes de la figure II.3

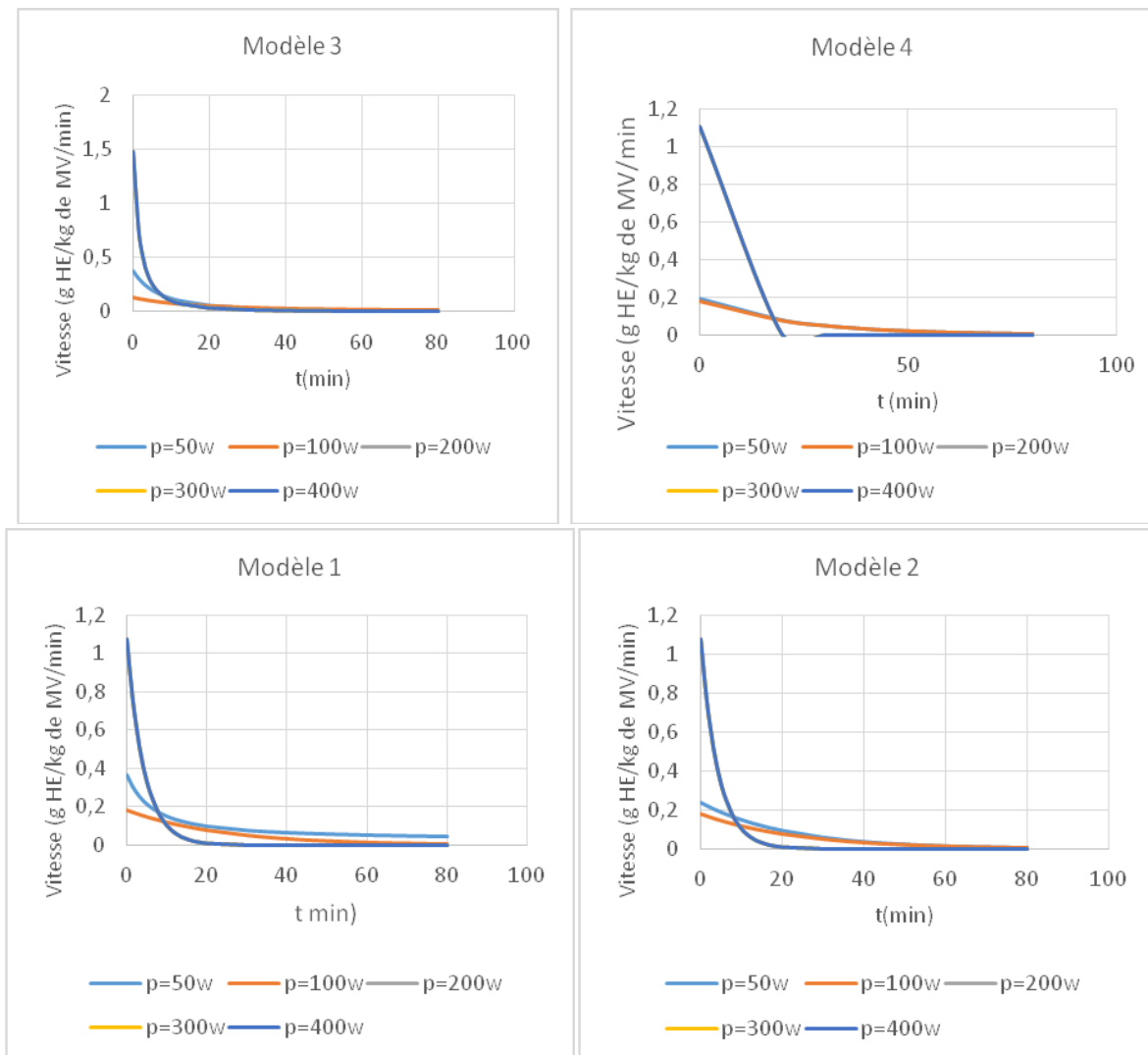


Figure II.3 : L'évolution de la vitesse d'extraction de l'huile essentielle de la lavande en fonction du temps sous les différentes puissances de chauffe, simulée par les 4 modèles, (procédé d'extraction SDF).

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

Interprétation des résultats :

Comme dans le cas de l'hydrodistillation nous remarquons que pour les quatre modèles développés que la vitesse initiale d'extraction augmente avec la puissance de chauffe jusqu'à une valeur limite au-delà de laquelle aucun changement de la cinétique n'est perceptible.

II.1.3. Influence de la température sur la vitesse d'extraction par fluide supercritique : [12]

Dans ce paragraphe nous nous intéressons à l'examen de l'influence de la température sur la vitesse d'extraction par fluide supercritique des feuilles de lavande séchées sur la base des travaux d'Akgun et al. [13] et rapportés par Sovova [12]. Ces évolutions sont représentées sur les graphes de la figure II.4.

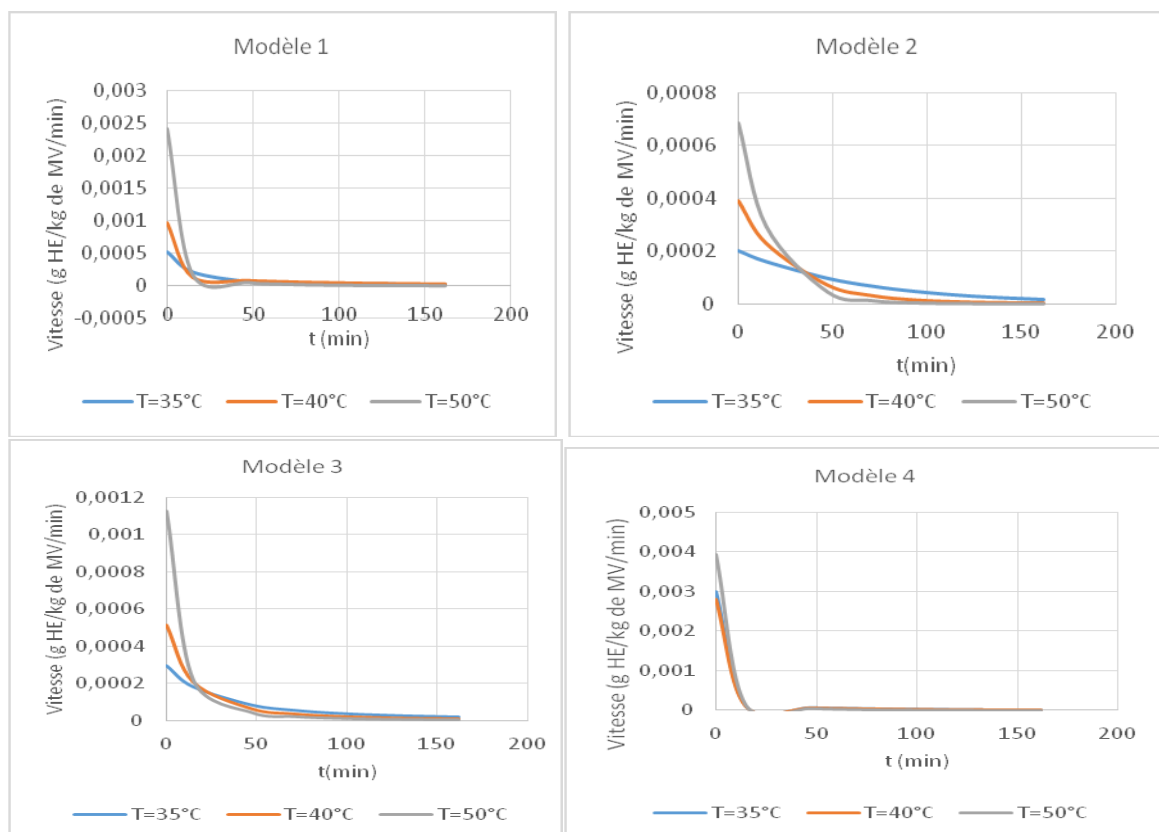


Figure II.4 : L'évolution de la vitesse d'extraction de l'huile essentielle de la lavande en fonction du temps sous les différentes températures, simulée par les 4 modèles, (procédé d'extraction fluide supercritique).

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

✚ Interprétation des résultats :

Dans le cas de l'extraction par fluide supercritique nous remarquons que la vitesse initiale d'extraction augmente avec la température.

Ces figures indiquent aussi que la vitesse d'extraction diminue jusqu'à s'annuler, après environ 50 min de traitement.

II.1.3. Influence de l'utilisation des micro-ondes sur la vitesse d'extraction :

Plusieurs travaux ont montré l'intérêt de l'utilisation des procédés assistés par micro-ondes, dans ce qui suit, nous allons tenter d'approcher un indicateur d'accélération du procédé par utilisation des micro-ondes par comparaison de l'évolution de la vitesse d'extraction dans les procédés sans micro-ondes (classiques) avec ceux assistés par micro-ondes (innovants) et ce dans les cas de l'hydrodistillation et l'hydrodiffusion. Les graphes des figures II.5 et II.6 font ressortir cette comparaison pour l'hydrodistillation du thym [4] et l'hydrodiffusion de la lavande respectivement [11].

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

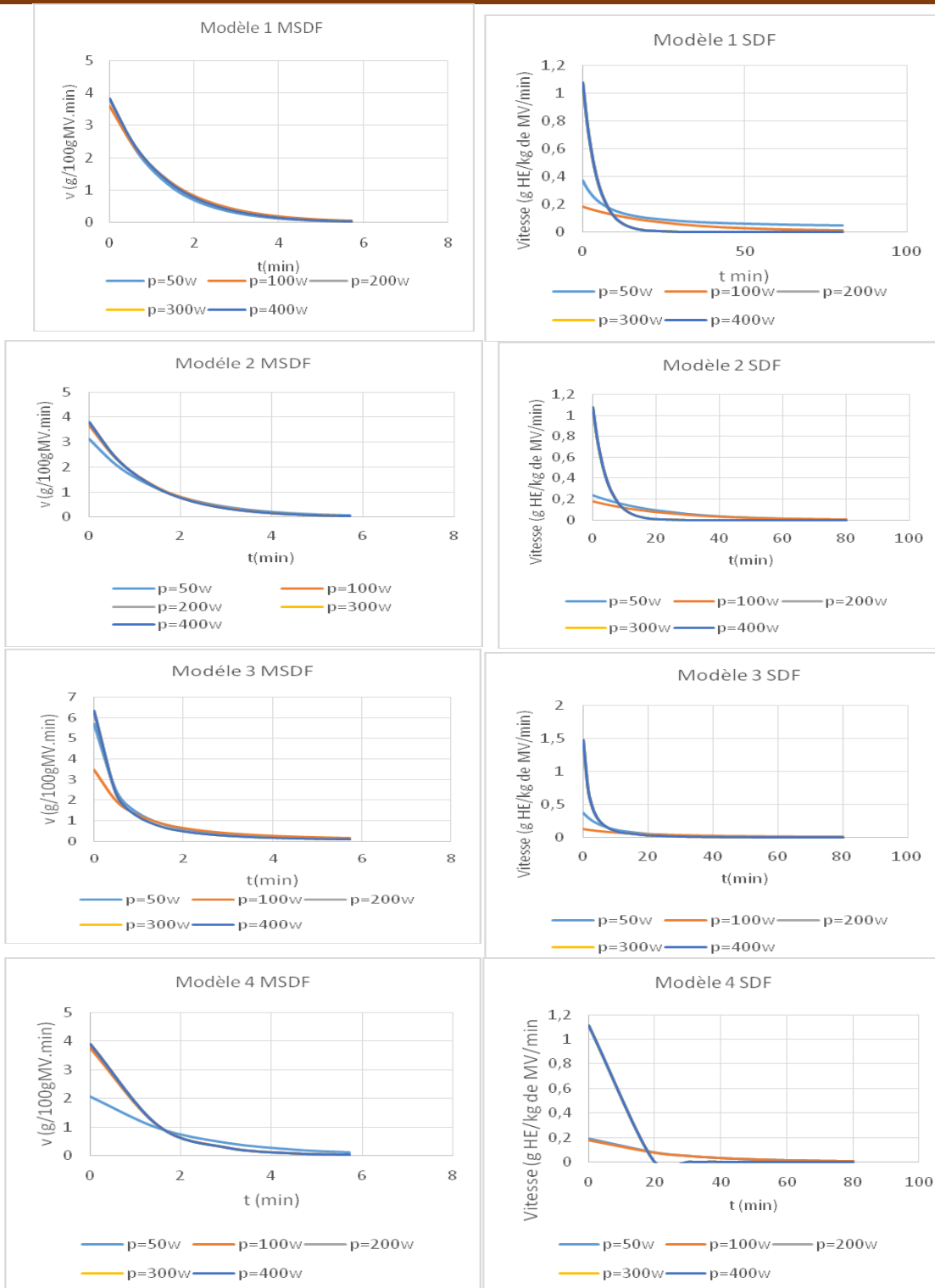


Figure II.5 : L'évolution de la vitesse d'extraction de l'huile essentielle de la lavande par les deux méthodes d'extraction hydrodiffusion et hydrodiffusion assisté par micro-onde, simulée par les 4 modèles.

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

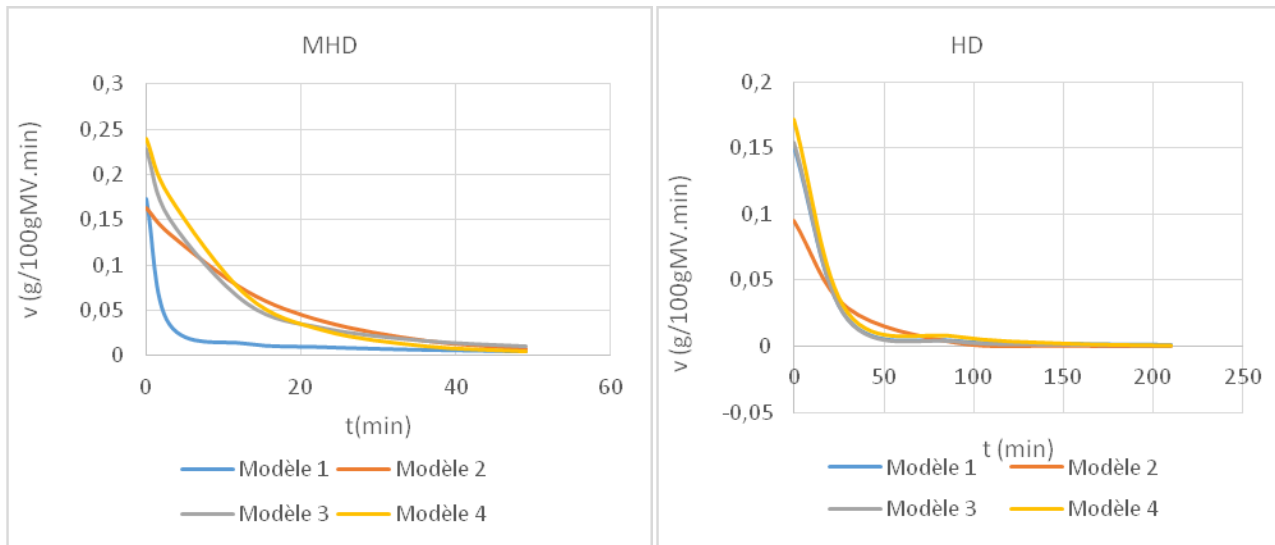


Figure II.6 : L'évolution de la vitesse d'extraction de l'huile essentielle du thym par les deux méthodes d'extraction hydrodistillation (HD) et hydrodistillation assisté par micro-onde(MHD), simulée par les 4 modèles.

✚ Interprétation des résultats :

A partir de ces deux dernières figures nous remarquons que les micro-ondes ont une influence positive sur la vitesse initiale d'extraction et permettent la réduction de la durée de traitement afin d'atteindre l'épuisement de la matière végétale correspondant à des vitesses d'extraction nulles.

II.2. Modélisation énergétique :

Cette partie est consacrée à l'étude de l'évolution de la consommation énergétique durant le processus d'extraction de l'huile essentielle à partir des trois plantes.

Le développement mathématique suivant permet d'exprimer la consommation énergétique en quantité d'énergie par gramme d'huile essentielle extraite :

On a :

$$P = E/t \quad (II.10)$$

Et $v = dy / dt$; v est exprimée en gHE/t

D'où :
$$P/v = (E/t) / (gHE/t) = E/gHE \quad (II.11)$$

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

Donc l'expression de la quantité d'énergie consommée par gramme d'huile extraite est donnée comme suit :

- Dans le cas de simulation avec le modèle 1 :

$$E/gHE(t) = P/y_{\infty} * \left(\frac{f*b}{(t+b)^2} + K * (1-f) * \exp(-K * t) \right) \quad (II.12)$$

- Dans le cas de simulation avec le modèle 2 :

$$E/gHE(t) = P / y_{\infty} * K * \exp(-Kt) \quad (II.13)$$

- Dans le cas de simulation avec le modèle 3 :

$$E/gHE(t) = P / \left\{ y_{\infty} * \left(\frac{b}{(t+b)^2} \right) \right\} \quad (II.14)$$

- Dans le cas de simulation avec le modèle 4 :

$$E/gHE(t) = P / y_{\infty} * (f * k_1 * e^{-k_1 t} + (1-f) * k_2 * e^{-k_2 t}) \quad (II.15)$$

II.2.1. Evolution de la consommation énergétique dans les procédés d'extraction par hydrodistillation :

Dans cette partie nous avons tenté d'examiner l'influence de la puissance utilisée sur la consommation énergétique dans les procédés d'extraction par hydrodistillation (HD). Cette influence a été étudiée dans le cas de l'hydrodistillation de l'arbousier [9] et des baies de genévrier [3]. Les évolutions de la consommation énergétiques obtenues par le rapport de la puissance et la vitesse d'extraction, pour les deux espèces végétales sont données par les courbes des figures II.7 et II.8.

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

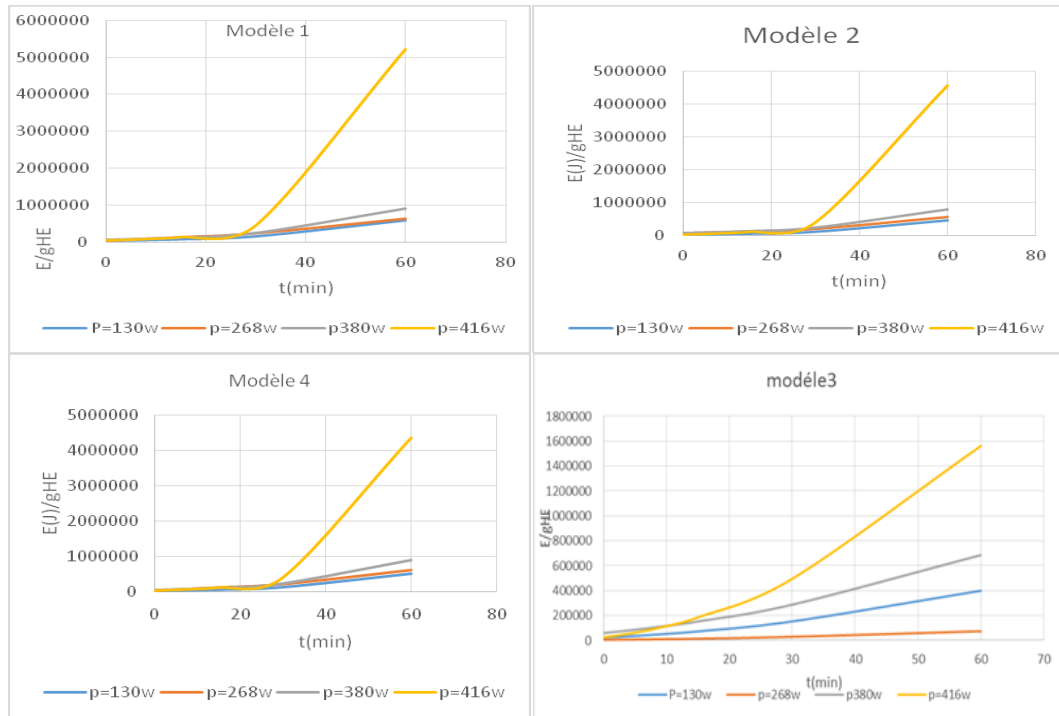


Figure II. 7 : L'évolution de la consommation énergétique par gramme d'huile essentielle d'arbousier extraite en fonction du temps sous les différentes puissances de chauffe, simulée par les 4 modèles (Le procédé d'extraction HD).

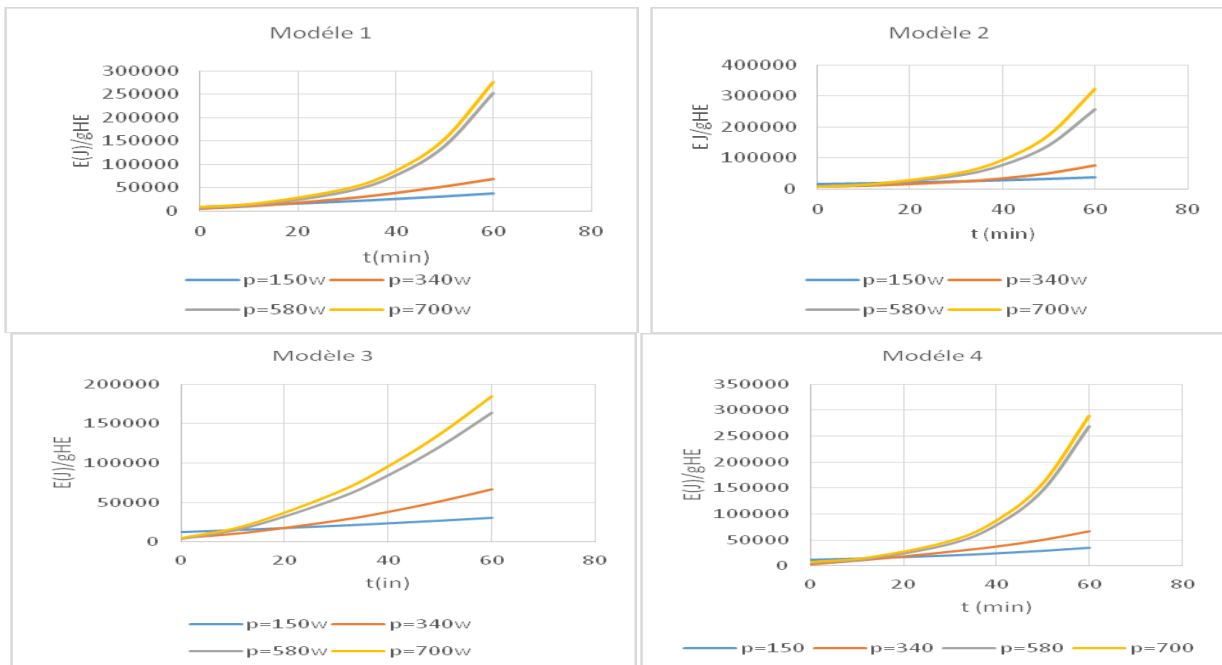


Figure II.8 : L'évolution de la consommation énergétique par gramme d'huile essentielle de genévrier extraite en fonction du temps sous les différentes puissances de chauffe, simulée par les 4 modèles (Le procédé d'extraction HD).

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

Interprétation des résultats :

L'examen de ces courbes montre l'énergie consommée par gramme d'huile essentielle extraite, devient de plus en plus importante quand on augmente la puissance de chauffe, comme le montre les figures II.7 pour l'arbousier, II.8 pour le genévrier respectivement, représentant son évolution en fonction du temps sous les différentes puissances de chauffe.

II.2.2. Influence de la puissance sur la consommation énergétique dans les procédés d'extraction par hydrodiffusion :

Nous avons étudié dans cette partie l'influence de la puissance de chauffage sur la consommation énergétique lors des procédés d'extraction dans le cas du traitement de la lavande par hydrodiffusion (SDF) [11]. Les évolutions de la consommation énergétique obtenues par le rapport des puissances et les vitesses d'extraction, sont représentées sur les graphes de la figure II.9

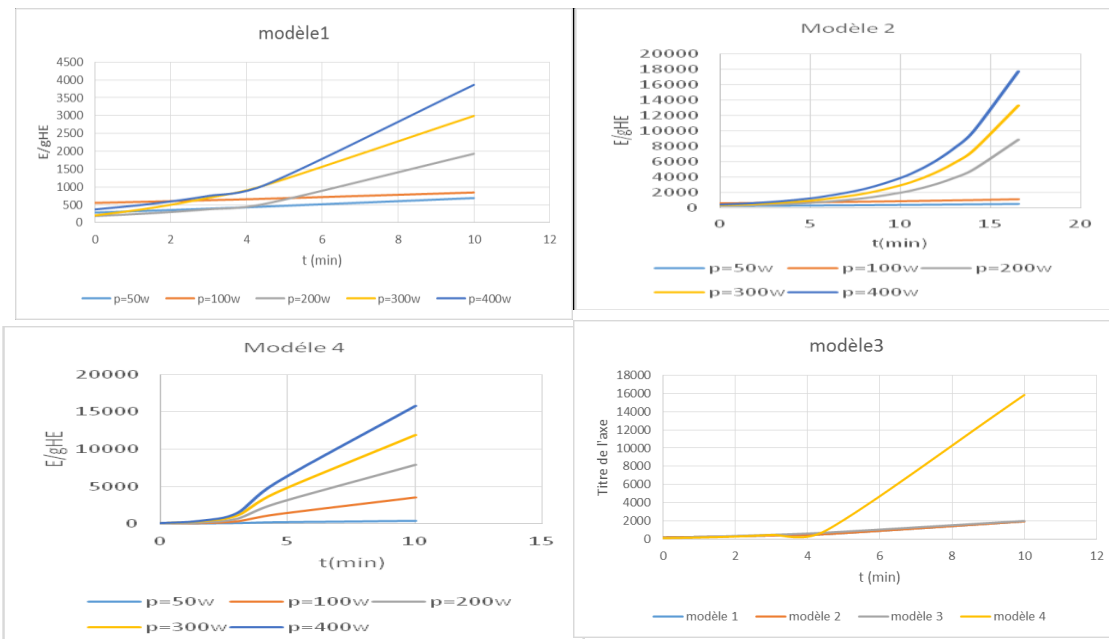


Figure II.9 : L'évolution de la consommation énergétique par gramme d'huile essentielle de la lavande en fonction du temps sous les différentes puissances de chauffe, simulée par les 4 modèles, (Le procédé d'extraction SDF).

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

Interprétation des résultats :

Comme dans le cas de l'hydrodistillation nous remarquons pour les quatre modèles développés que la consommation énergétique par gramme d'huile de la lavande augmente avec la puissance de chauffe.

II.2.3. Influence de l'utilisation des micro-ondes sur la consommation énergétique :

Plusieurs travaux ont montré l'intérêt de l'utilisation des procédés assistés par micro-onde, dans ce qui suit, nous allons tenter d'estimer le gain en énergie qu'engendrent les procédés dits innovants et écologiques et qui sont assistés par micro-ondes. Cette estimation est faite par la comparaison de l'évolution de la consommation énergétique dans les procédés sans micro-ondes (classiques) avec ceux assistés par micro-ondes (innovants) et ce dans les cas de l'hydrodiffusion de la lavande.

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

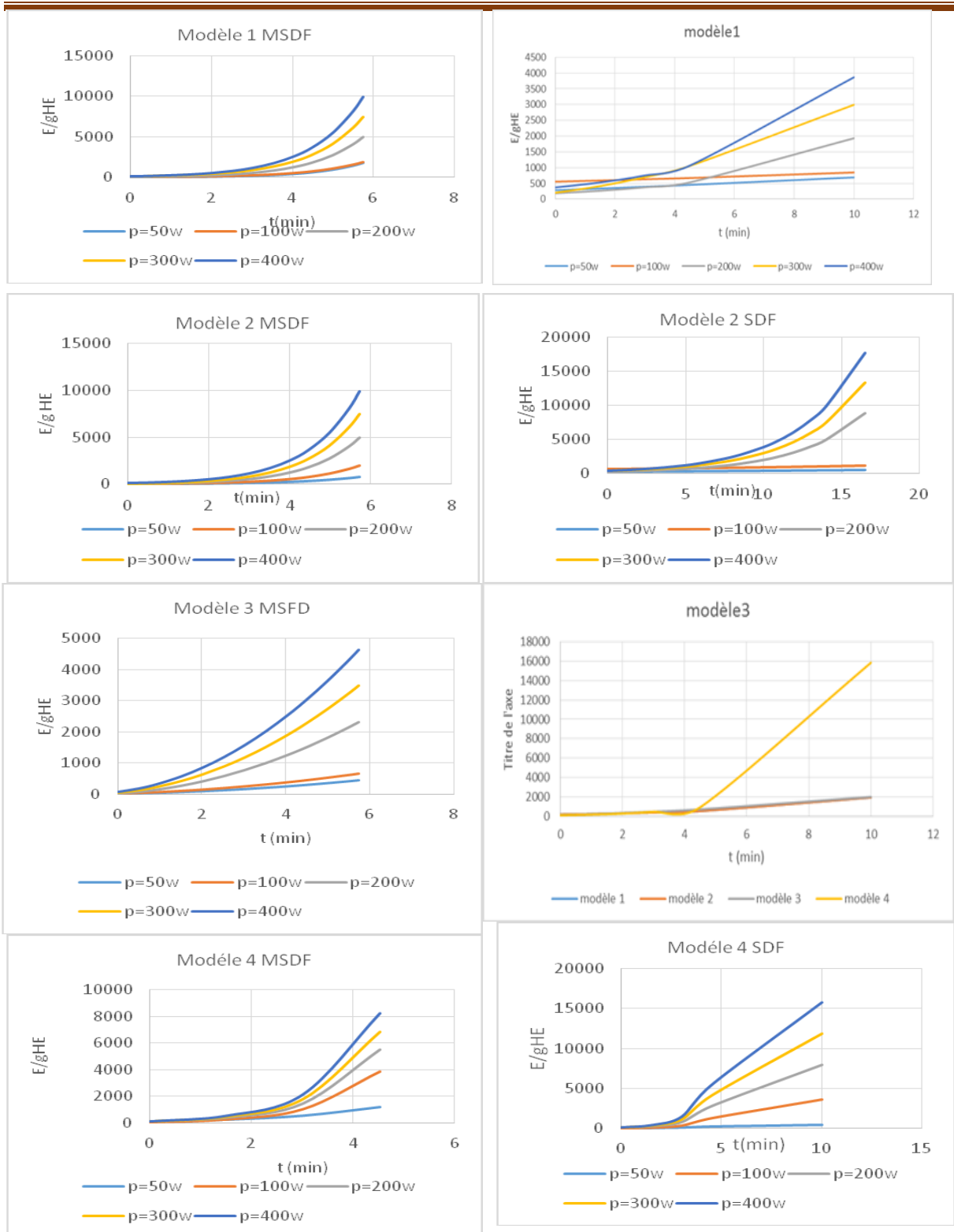


Figure II.10 : L'évolution de la consommation d'énergie par gramme d'huile de la lavande, par les deux méthodes d'extraction hydrodiffusion (SDF) et hydrodiffusion assisté par micro-onde(MSDF), simulée par les 4 modèles.

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

✚ Interprétation des résultats :

Dans le cas de procédé d'extraction (MSDF), on constate une réduction conséquente de temps et de la consommation d'énergie, comparons au procédé d'extraction classique (SDF).

La figure II.11. représente la consommation énergétique par gramme d'huile en fonction du temps réduit t_r ce dernier représente le temps de l'extraction par rapport au temps limite de l'extraction dans le but d'uniformiser l'échelle afin de comparer entre les deux procédés tel que à $p=0w$ représente la consommation énergétique dans le cas de procédé d'extraction d'hydrodiffusion classique et les autre puissances représentent la consommation dans le cas d'hydrodiffusion assistée par micro-onde.

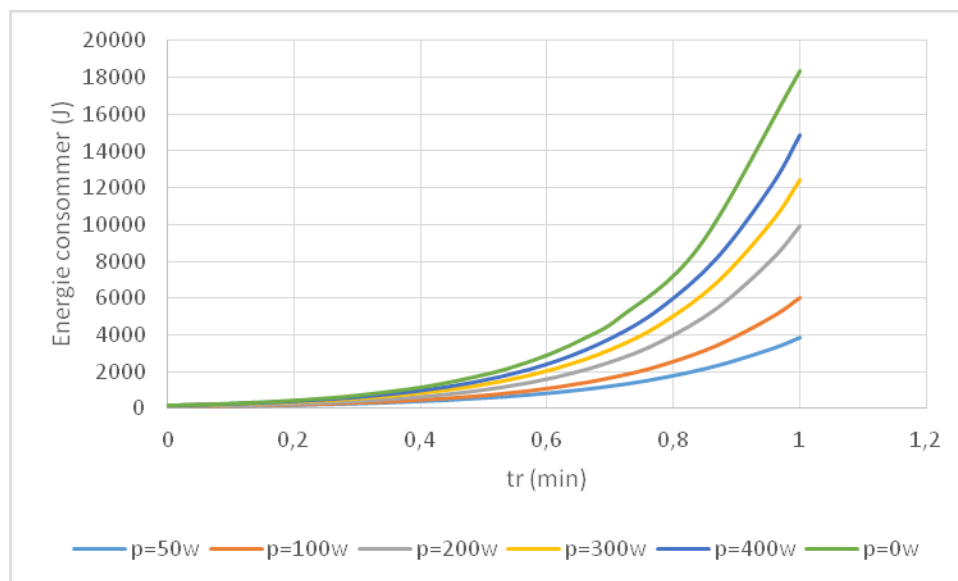


Figure II.11. l'évolution de la consommation d'énergie en fonction du temps réduits dans le cas des deux procédé d'extraction (MSDF)et (SDF),simulé par le modèle 2.

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

D'après les résultats de la figure II.11 on constate que dans le procédé d'extraction (SDF) $p=0$ w l'énergie consommée est très importante par rapport au procédé MSDF. Donc on conclut que dans le cas des procédés assistés par micro-onde, plus la puissance augmente plus la consommation d'énergie devient importante.

On constate que la facture énergétique augmente exponentiellement, sachant que si on fixe approximativement ce point de transition à 40 min, dans le cas de l'extraction de l'huile d'arbousier, on aurait extrait pratiquement 80% de la quantité maximale pouvant être obtenue avec les trois puissances de chauffe : 130W, 268W, 380W et dépasser les 80% sous des puissances de chauffe de 340W, 580W et 700W , en le fixant à 30 min, dans le cas de l'extraction de l'huile de genévrier, comme l'approuve les figures II.12 et II.13.

Et on aurait extrait 80% sous des puissances de chauffe : 50w, 100w, en fixant $t= 40$ min et de $t= 1$ min 30 seconde dans le cas d'extraction de l'huile de la lavande par le procédé (SDF) et (MSDF) respectivement. Comme l'approuve les figures II.14 et II.15.

Et dans le cas du procédé d'extraction par CO_2 supercritique si en fixant $t= 40$ min et $T=35^\circ\text{C}$ on remarque que la quantité extraite est de 60% et 90% pour $T= 40$ et 50°C d'huile de la lavande. Comme l'approuve la figure II.16.

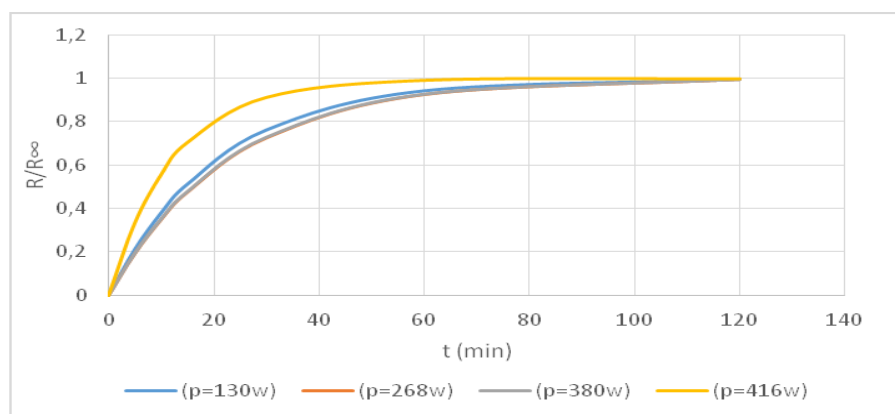


Figure II.12 : L'évolution du rapport R/R_∞ en fonction du temps, dans le cas de l'extraction de l'huile d'arbousier par le procédé d'extraction (HD).

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

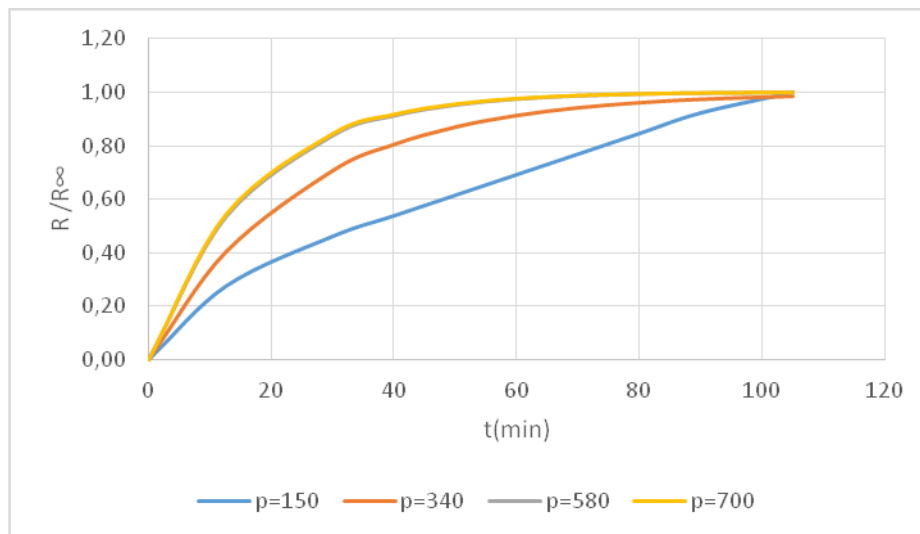


Figure II.13 : L'évolution du rapport R/R_{∞} en fonction du temps, dans le cas de l'extraction de l'huile de genévrier par le procédé d'extraction (HD).

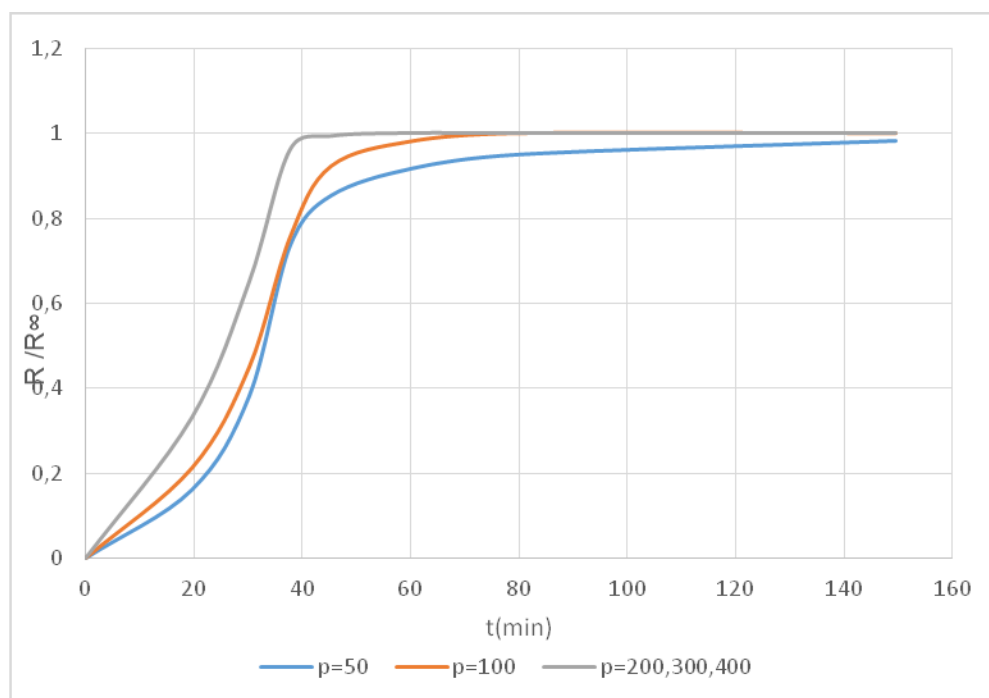


Figure II.14 : L'évolution du rapport R/R_{∞} en fonction du temps, dans le cas de l'extraction de l'huile de la lavande par le procédé d'extraction (SDF).

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

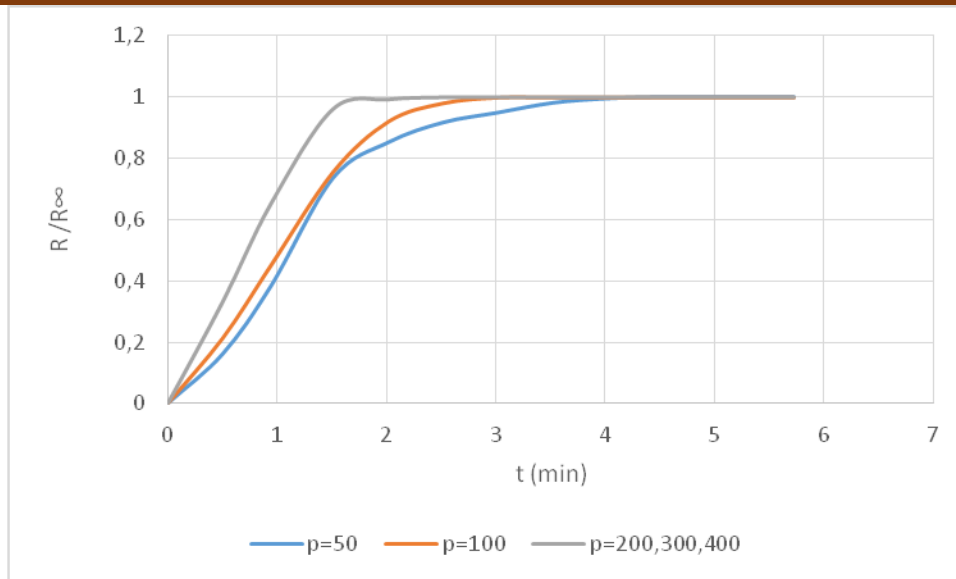


Figure II.15 : L'évolution du rapport R/R_{∞} en fonction du temps, dans le cas de l'extraction de l'huile de la lavande par le procédé d'extraction (MSDF).

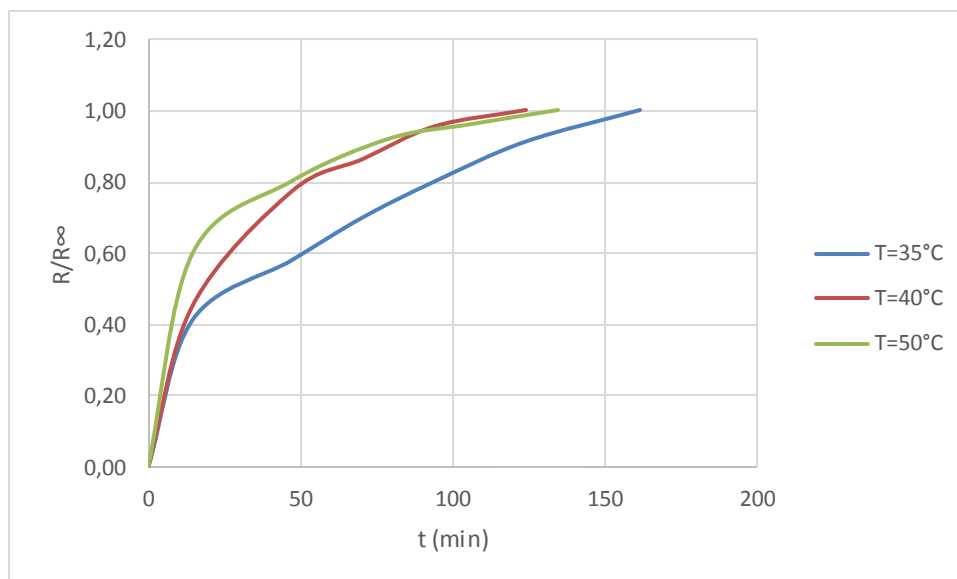


Figure II.16 : L'évolution du rapport R/R_{∞} en fonction du temps, dans le cas de l'extraction de l'huile de la lavande par le procédé d'extraction CO_2 supercritique.

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

Pour une meilleure maîtrise de la consommation énergétique du procédé d'extraction, nous avons pensé à représenter l'évolution de l'énergie consommée avec la quantité d'huile essentielle extraite R/R_∞ (le rendement à l'instant t /le rendement final). Sachant que l'énergie consommée est le produit de la puissance utilisée et de la durée d'extraction.

-Dans le cas de l'arbousier :

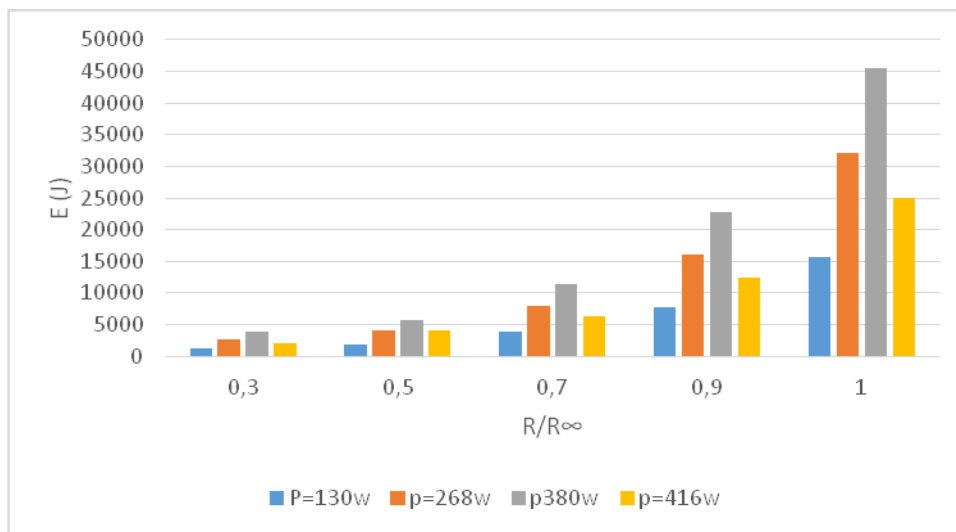


Figure II.17 : L'évolution de la consommation énergétique en fonction du rapport R/R_∞ . Pour l'arbousier dans le cas de procédé d'extraction (HD).

-Dans le cas de genévrier :

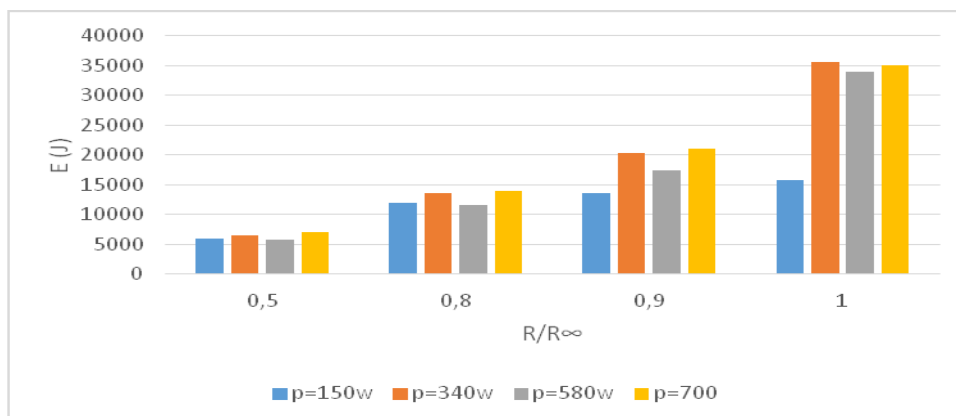


Figure II.18 : L'évolution de la consommation énergétique en fonction du rapport R/R_∞ . Pour le genévrier dans le cas de procédé d'extraction (HD).

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

-Pour la lavande dans le cas de procédé d'extraction (SDF) :

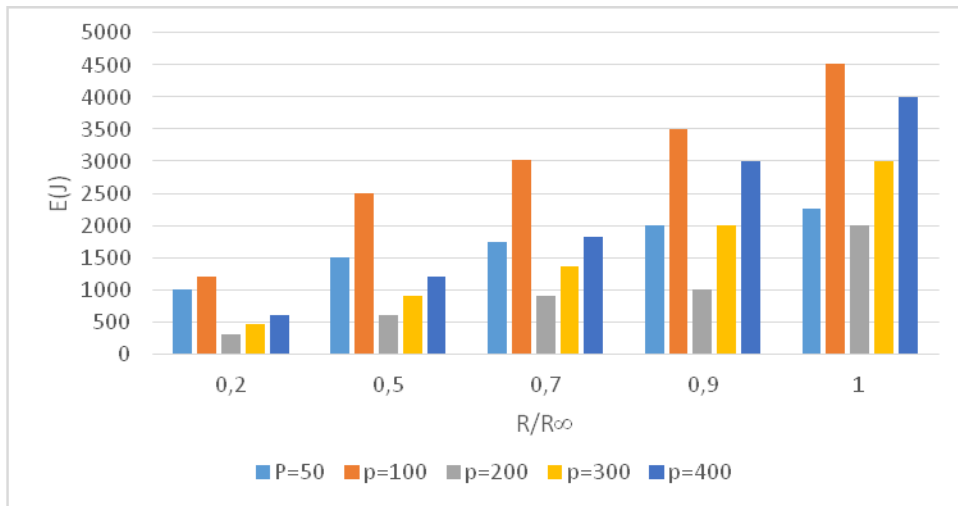


Figure II.19 : L'évolution de la consommation énergétique en fonction du rapport R/R_{∞} . Pour la lavande dans le cas de procédé d'extraction (SDF).

- Pour la lavande dans le cas de procédé d'extraction(MSDF) :

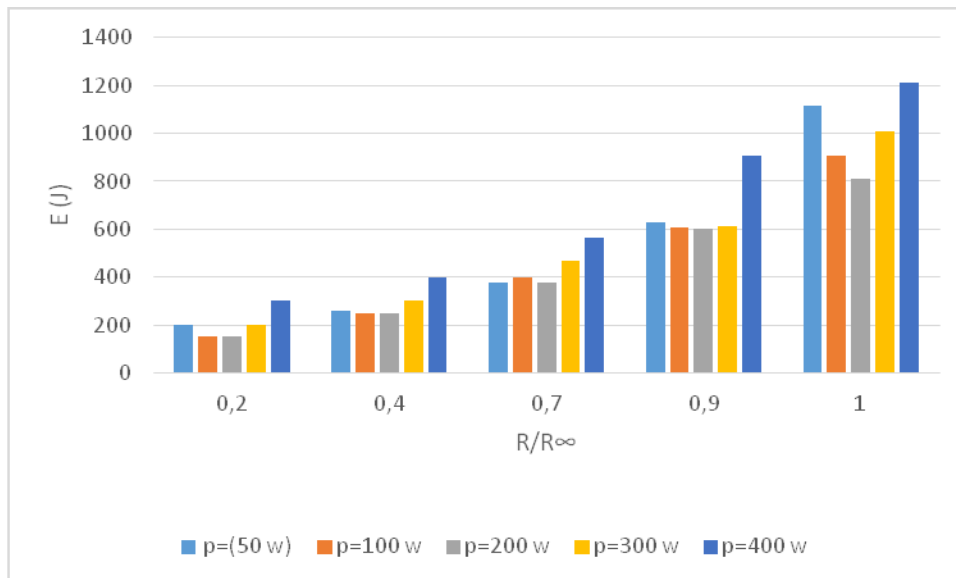


Figure II.20 : L'évolution de la consommation énergétique en fonction du rapport R/R_{∞} Pour la lavande dans le cas de procédé d'extraction (MSDF).

Chapitre II : Modélisation de la consommation énergétique lors d'extraction des huiles essentielles.

Les figures II.17, II.18 et II.19, II.20, représentent l'élévation considérable de la consommation énergétique à partir d'un certain rapport R/R_{∞} , cette consommation se multiplie pratiquement par deux, en passant de l'extraction de 70% à 100% de la quantité maximale d'huile pouvant être obtenue à l'équilibre, ce qui prouve qu'un épuisement total de l'huile contenue dans la matière végétale est loin d'être rentable, en effet, l'impact environnemental ainsi que le coût de production évolueront dans le même sens et avec la même amplitude que la consommation énergétique, bien que les prix de vente restent constants.

Les figures II.17, II.18 montrent également que les puissances de chauffe intermédiaires (268W, 380W), et (340W, 700W) dans le cas de l'extraction de l'huile d'arbousier et de genévrier respectivement, impliquent les consommations énergétiques les plus importantes.

Et dans le cas de l'extraction de l'huile de la lavande les figures II.19, II.20 montrent que les puissances de chauffe (50W, 400W), et (100W, 400W) par le procédé d'extraction (MSDF) et (SDF) respectivement, impliquent les consommations énergétiques les plus importantes.

On remarque aussi que la consommation énergétique est plus importante pour le procédé (SDF) comparé au procédé (MSDF).

Conclusion :

On conclut à partir de ces résultats que l'extrait récupéré à la fin des différents procédés d'extraction est très coûteux énergétiquement, mais le prix de vente reste constant.

Conclusion générale

La démarche de modélisation de la consommation énergétique lors de l'extraction des huiles essentielles par différents procédés classiques et innovants, proposé dans ce travail, a permis de vérifier que les procédés classiques devient, effectivement, énergivore par rapport aux procédés innovants, de ce fait, des économies d'énergie peuvent être réalisées en évitant les procédés classiques.

Dans un premier temps, nous avons appliqué des modèles de premier ordre et d'autres à deux constantes de temps aux cinétiques d'extractions étudiées, et nous avons constaté que les modèles simulent bien les résultats expérimentaux, sur la base de ce constat, nous avons défini la consommation énergétique comme étant une quantité d'énergie par unité de masse de l'huile produite en divisant la puissance de chauffe par la vitesse d'extraction, ainsi nous avons pu démontré que l'évolution de la consommation énergétique est de type exponentielle et qu'elle augmente considérablement à partir d'un certain temps d'extraction.

Dans un second temps, nous avons utilisé les équations établies lors de la simulation des cinétiques d'extraction avec le modèle de premier ordre, pour exprimer l'évolution de l'énergie consommée en fonction de temps réduit afin de comparer entre les deux procédés assistés par micro-onde et classiques, les résultats trouvés montrent, pour les procédés classique l'énergie consommée et très importante par rapport au procédés assistés par micro-onde.

le présent travail nous a permis d'apporter une contribution à la modélisation de la cinétique d'hydrodistillation de l'huile essentielle tenant compte de la complexité de sa composition et l'hétérogénéité de la structure du solide d'origine végétal, chose qui ne permet pas de considérer que l'huile est répartie uniformément.

La distribution n'est pas nécessairement uniforme de l'huile au sein du végétal est prise en ligne de compte puisque deux processus d'extraction simultanés ont été envisagés. Un processus de lavage de l'huile présente sur la surface de la matière végétale (gouverné par les lois d'équilibre entre phases) et un processus de diffusion plus lent du soluté interne à travers le solide.

Malgré la bonne simulation de l'ensemble des cinétiques considérées par notre approche, nous ne pouvons classer l'équation obtenue comme modèle en l'absence de validation par signification physique cohérente de ses paramètres. Au plus, nous pouvons dire que nous avons élaboré une corrélation qui traduit l'évolution du rendement en fonction de la durée de traitement.

Bibliographie :

- [1] Benyoussef, E. H., Hasni, S., Belabbes, R. & Bessiere, J. M. 2002 Modélisation du transfert de matière lors de l'extraction de l'huile essentielle des fruits de coriandre. *Chemical Engineering Journal* 85, 1-5.
- [2] H.Sovova, A-S.Aleksovski, 2006 « Modèle mathématique pour l'hydrodistillation des huiles essentielles » *Flavour.Frag.j.* 21 ,881-889.
- [3] Milojević, S. \vZ, Stojanović, T. D., Palić, R., Lazić, M. L. & Veljković, V. B. (2008) Kinetics of distillation of essential oil from comminuted ripe juniper (*Juniperus communis* L.) berries. *Biochemical Engineering Journal* 39, 547-553.
- [4] M.-T. Golmakani, K. Rezaei, (2008) Comparison of microwave assisted hydrodistillation with the traditional hydrodistillation method in the extraction of essential oils from *Thymus vulgaris* L., *Food Chem.* 109 925-930.
- [5] M. Spiro, M. Kandiah. 1989 *Int. J. Food Sci. Technol.*, 24, 601.
- [6] D.Garikapati, K.Babu, B.Singh, (2009) Simulation of *Eucalyptus cinerea* oil distillation: A study on optimization of 1, 8-cineole production, *Biochemical Engineering Journal* 44 pp 226-231.
- [7] N. Bousbia, M.A. Vian, M.A. Ferhat, E. Petitcolas, B.Y. Meklati, F. Chemat, (2009) Comparison of two isolation methods for essential oil from rosemary leaves: Hydrodistillation and microwave hydrodiffusion and gravity, *Food Chem.* 114 355-362.
- [8] M.A. Ferhat, B.Y. Meklati, F. Chemat, (2007) Comparison of different isolation methods of essential oil from Citrus fruits: cold pressing, hydrodistillation and microwave "dry" distillation, *Flavour Fragrance J.* 22 494-504.

- [9] El-Hadi Benyoussef, Rahma Bessah, (2014) Potential of Renewable Energies Integration In An Essential Oils Extraction Process Applied Mechanics and Materials Vol. 492, 561-567
- [10] Asma Farhat, Anne-Sylvie Fabiano-Tixier, Mohamed El Maataoui, Jean Francois Maingonnat, Mehrez Romdhane, Farid Chemat, Microwave steam diffusion for extraction of essential oil from orange peel: Kinetic data, extract's global yield and mechanism.
- [11] Asma Farhat, Christian Ginies, Mehrez Romdhane, Farid Chemat. (2009) Eco-friendly and cleaner process for isolation of essential oil using microwave energy. Food Chemistry 4, 2514-2521.
- [12] Helena Sovova, (2012) Steps of supercritical fluid extraction of natural products and their characteristic times, J. of Supercritical Fluids 66, 73-79.
- [13] M. Akgun, N.A. Akgun, S. Dincer, (2000) Extraction and modeling of lavender flower essential oil using supercritical carbon dioxide, Industrial and Engineering Chemistry Research 39 473-477.