

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



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie Chimique

PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme
d'ingénieur d'état en Génie Chimique

Thème

MODELISATION DE TRANSFERT DE MATIERE LORS DE L'EXTRACTION DES ESSENCE DES GRAINES DE CORIANDRE PAR SOLVANTS

Proposé et Dirigé par:

Pr. E.H.BENYOUSSEF

Pr.S.CHARCHARI

Etudié par:

Mr.F.H.REBAHI

Promotion 2006

ENP,10Avenue Hassan Badi EL-Harrach Alger.

ملخص:

البحث عن النماذج لتمثيل ظاهرة انتقال المادة عند عملية استخلاص جوهر بذور الكسبرة بالمحاليل الطيارة.

هذا العمل هو دراسة عملية استخلاص جوهر بذور الكسبرة بواسطة المحاليل الطيارة, وذلك باستعمال الأعمال السابقة في هذا الميدان التي اهتمت بدراسة متابعة تركيز الجوهر المستخلص في المادة السائلة بدلالة الزمن, وكذلك معرفة التركيز الابتدائي للمستخلص في البذور.

وقد تم استعمال نموذجين لمحاولة إيجاد الدالة المثالية لتعبير عن حركية الاستخلاص, ولذلك تم البرهان على صحة بعض فرضيات هذه النماذج في أول الأمر ثم تم استنتاج نموذج سهلا من ثانيهما بواسطة معطيات قليلة وسهلة المثال. وأخيرا قمنا بتطبيق هذا النموذج المقترح على نظام آخر من التجارب وهذا كله لتوصل إلى معامل لانتشار وبعده, معامل العام الانتقال المادة

الكلمات المفاتيح: بذرة الكسبرة, الاستخلاص من النظام صلب-سائل, معامل الانتشار, المعامل العام لانتقال المادة

Résumé

Modélisation de l'extraction des essences de graines de coriandre par solvant.

Ce travail a porté sur l'étude de la cinétique d'extraction des essences de coriandre par solvant. Afin, de modéliser l'évolution de cette cinétique nous avons appliqué deux modèles aux résultats expérimentaux de quelques travaux antérieurs ou les auteurs ont suivi cette évolution en fonction du temps. En premier lieu, vérifier sur la base de données expérimentales certaines des hypothèses émises par leurs auteurs lors du développement des modèles. Nous avons aussi développé à l'aide du deuxième modèle, une méthode de détermination du coefficient de diffusion qui nécessite un nombre réduit d'expériences. Pour conclure, nous avons appliqué cette méthode à un autre système.

Mots clés: graines de coriandre, extraction solide-liquide, coefficient de diffusion, coefficient global de transfert de matière

Summary

Modeling of the extraction of the seed oils of coriandre by solvent.

This work related to the study of kinetics extraction the oils of coriandre by solvent. So, to model the evolution of this kinetics we have bracket two model with the experimental results of some former work or the author one followed this evolution according to time. In first places, to check on the basis of experimental data some of the assumption emitted by their authors during the development of the models. We also developed using the second model, a method of determination of the coefficient of diffusion which requires a number reduced of experiments. To conclude, we applied this method another system.

Key words: coriandre seeds, solid-liquid extraction, diffusion coefficient, global mass transfer coefficient.

Remerciements

Que mes premiers et ultimes remerciements soient adresser a notre seigneur **ALLAH**, dès lors que nous comptons sur sa détermination des événements par sa clémence et sa miséricorde. Je le remercie de m'avoir donné se souffle intérieur de courage et de persévérance, nécessaire à l'accomplissement de n'importe la quelle des tâche, qui plus est la quête du savoir et de la connaissance.

Je tiens par ailleurs, à remercier, ceux qui par leur affection et leur amour, ont su d'une manière ou d'une autre, me guider dans toutes les circonstances de la vie, et m'aider à chaque nouvelle entreprise, en l'occurrence, mes chers parents, mon père et ma mère qui du fond de leur nid protecteur, n'ont ménagé aucun effort pour me soutenir et m'épauler dans cette ardente démarche qui est la mienne.

Je remercie aussi ma femme A.A, qui m'a encouragé et remonté le morale dans les moments les plus difficiles.

Je remercie également mes promoteurs : Pr. BENYOUSSEF. Pr. CHARCHARI, qui sans leurs encadrements et leurs orientations, ce travail n'aurait certainement pas vu le jour et je les remercie aussi pour leur patience avec moi.

Je tiens à adressé mes vifs remerciements aux membres du jury: Pr. Derriche et Dr Naamane, leur apport considérable, qui sera certainement très utile.

En fin, je remercie tous mes professeurs, l'ensemble de mes camarades et amis qui m'ont aidé à accomplir ce travail.

Et que ALLAH prie sur notre Maître Mohammed, sur sa Famille et sur ses compagnons et qu'il le salue abondamment.

Rebahi Feth-allah

Sommaire

Introduction.....	1
CHAPITRE I : La matière végétale	
I.1.Historique.....	2
I.2.Déscription	2
I.3.Variétés de la coriandre.....	4
I.4.Culture et récolte.....	4
I.5. Utilisation traditionnelle et vertus	5
I.6.Composition chimique	6
I.7.Localisation de l'huile essentielle dans le fruit de coriandre.....	8
CHAPITRE II. Extraction des essences de graines de coriandre par solvant	
II.1.Extraction solide-liquide	11
II.1.1.Extraction par solvants volatils.....	12
II.1.2.Facteurs intervenant dans l'extraction solide-liquide.....	12
II.1.2.1. Nature et état du solide et du soluté.....	13
II.1.2.2. Nature du solvant.....	13
II.1.2.3. Température.....	14
II.1.2.4. Degré d'agitation.....	14
II.1.2.5. Taux d'humidité du solide.....	14
II.1.2.6. Durée d'extraction.....	14
II.1.2.7. Hydromodule.....	14
II.2.Définition des systèmes solide-liquide étudiés	15
II.2.1.La phase solide.....	15
II.2.1.1 Théorie d'échantillonnage.....	15
II.2.1.2.Procédure.....	15
II.2.1.3. Diamètre moyen et sphéricité des graines.....	16
II.2.1.4. Détermination de la masse volumique des graines de coriandre	16
II.2.3. Le soluté.....	17

CHAPITRE III Travaux antérieurs

III.1. Etude cinétique de l'extraction des essences des graines de coriandre réalisée dans différentes conditions opératoires	18
III.2. Détermination du coefficient de diffusion lors de l'extraction des graines de coriandre par le méthanol	19
III.3. Détermination du coefficient de diffusion lors de l'extraction des essences des graines de coriandre par l'éthanol et le binaire éthanol-eau à 75 % en éthanol	19
III.4. Modélisation du transfert de matière lors de l'extraction des essences des graines de coriandre par l'éthanol	21

CHAPITRE IV Modélisation du transfert de matière

IV.1. Présentation du 1 ^{er} modèle	23
IV.1.1. Bilan de matière	23
IV.1.2. L'équation de continuité dans le cas d'une sphère	25
IV.1.3. Conditions aux limites	26
IV.1.4. Résolution des équations de transfert de matière	27
IV.2. Présentation du 2 ^{ème} modèle	29
IV.2.1. Hypothèses simplificatrices	30
IV.2.2. Développement mathématique	30
IV.2.3. Relation entre α et s	31
IV.2.4. Relation entre D et K	32

CHAPITRE V Validation du modèle

V.1. Données expérimentales	33
V.1.1. Description de l'appareillage	33
V.1.2. Protocole expérimentale	33
V.1.3. Résultats expérimentaux	33
V.2. Vérification des hypothèses	36
V.2.1. Le coefficient de partage entre phase égale à l'unité	36
V.2.2. la constance du coefficient de diffusion	37
V.2.3.1. Calcul du coefficient de diffusion pour les temps courts	38
V.2.3.2. Calcul du coefficient de diffusion pour les temps longs	38
V.2.4. Vérification de l'hypothèse α infinie	39
V.2.5. Proposition d'une méthode de détermination du coefficient de diffusion ne nécessitant pas une étude cinétique	40

V.2.1. Description de la méthode.....	40
V.2.2 Validation du modèle.....	41
V.4.L'application du modèle a un autre système.....	42
Conclusion.....	45

Annexe.

Bibliographie.

Introduction

Les essences de coriandre obtenues lors de leur extraction par solvant volatil sont utilisées dans divers domaines de l'industrie: en agro-alimentaire, en cosmétologie et en pharmacie. Le rôle de l'ingénieur c'est de décrire le phénomène et de pouvoir dimensionner l'appareillage nécessaire.

C'est dans ce contexte, que nous nous sommes intéressés à la modélisation du transfert de matière lors de l'extraction par solvants volatiles des essences de coriandre.

Ce travail est constitué de cinq chapitres, dont le premier a été consacré à la description de la matière végétale utilisée. Le deuxième chapitre porte sur l'extraction solide-liquide. Le troisième chapitre traite des travaux antérieurs entrepris dans ce domaine et surtout ceux en relation avec notre travail.

Le quatrième chapitre est relatif à la modélisation du transfert de matière solide-liquide. A cet effet, deux modèles ont été développés, afin de simuler les données expérimentales et d'accéder aux grandeurs relatives aux transfert, en l'occurrence, le coefficient de diffusion et le coefficient de transfert de matière.

Le cinquième chapitre est consacré à la validation des modèles proposés, en comparant les résultats expérimentaux et simulés. Enfin, dans ce même chapitre sont regroupés et discutés tous les paramètres des modèles.

I.1.Historique [1]

Le mot coriandre vient du grec *koris* (punaise) en raison de l'odeur de ses feuilles. La coriandre est originaire du Moyen-Orient ou d'Asie Mineure, depuis, elle s'est largement répandue dans tout le bassin méditerranéen.

Elle est connue depuis la nuit des temps aussi bien pour ses propriétés médicinales que pour son utilisation en cuisine. Elle est évoquée dans de nombreux textes anciens : textes sanskrit divers, hiéroglyphes égyptiens, la bible (Exode 16:31, pour qualifier la manne), dans les Contes des Mille et une Nuits (comme aphrodisiaque), ... On connaît des traces de sa culture vieilles de plus de 3000ans.

Les Egyptiens l'utilisaient souvent : les graines parfumaient des galettes de céréales sous Ramsès. Dans les tombeaux de la XXI dynastie (1085-945 avant JC) on a retrouvé des graines de coriandre.

La coriandre arrive dans le nord de l'Europe avec les Romains qui l'utilisent pour conserver la viande (mélange de coriandre, cumin et vinaigre) ainsi que pour parfumer leurs pains. Mais au Moyen Age, son odeur de 'punaise' rends les gens méfiants et on la croit toxique .Elle arrive sur le nouveau continent avec les premiers colons européens.

I.2.Description [2]

La plante *Coriandrum sativum* L: appartient à la famille des apiacées, comme le persil, la carotte, le cumin.

Plante annuelle, elle est petite et peut atteindre 30 à 60 cm de haut mais avec des racines profondes. Ses feuilles, longues de 15 cm sont fines et délicates, lobées, plates, rattachée à une tige rameuse mince et fragile et deviennent de plus en plus découpées en remontant vers le haut de la tige. Si elles ressemblent au persil plat, on ne peut s'y méprendre pour son goût. Les feuilles du bas sont plus larges et renferment un arôme plus puissant.

Ses fleurs groupées en capitules dentelées sont teintées de blanc, de rose et de lavande qui produit une graine striée, rayée, de la grosseur d'un grain de poivre.

Une vue d'ensemble de la plante et de sa graine sont présentés sue la figure I.1 [3]



Figure.I.1. Vue d'ensemble le de la plante de coriandre et de sa graine

I.3.Variétés de la coriandre [2]

- *Coriandrum sativum* : 60cm, fleurs blanches en été, une feuille large et dentelée à odeur forte, suivantes fines et découpées avec parfum différent (plus piquant), comestibles à 100%, graines blondes, grosses, ovales, douces et fruitées.
- *Coriandrum sativum "Cilantro"*: proche de CS fleurs blanchâtres
- *Coriandrum sativum "Morocco"* : 70 cm, fleurs rosées, conseillé pour les graines (petite, sombre, saveur piquante)
- *Coriandrum sativum var. microcarpum* : cultivé en Russie et Europe centrale : graine diamètre inférieur 3mm, plus riche en huile essentielle que les autres variétés.

I.4.Culture et récolte

Cette plante pousse dans toutes les régions tempérées. Elle préfère les sols sains, compacts, qu'ils soient sableux ou argileux, perméable, frais, bien préparés et ensoleillés. Cependant elle s'adapte aussi dans des sols calcaires ou même acides [3].

Elle accepte des froids intenses au début et en fin de saison mais, perd un peu de sa vigueur lorsque la température est trop chaude [1]. Il a été rapporté que dans un froid extrême une courte saison de végétation, on obtient un bon rendement [4].

Les semences s'effectuent tôt au printemps pour les régions tempérées ; aux hivers rigoureux et à l'automne pour les endroits aux hivers doux. Il faut planter les graines à 6 cm de profondeur en créant des espaces de 20 à 25 cm environ. La coriandre n'aime pas la transplantation qui active et accélère sa floraison aussi doit-on semer en tenant compte de ce facteur. Les fleurs éclosent au bout de 9 semaines environ et produisent des graines à la fin de l'été.

Il faut pincer l'extrémité de la plante lorsqu'elle atteint 3 ou 4 cm pour lui permettre de buissonner.

Lorsque les graines virent du vert au jaune-brun, elles sont arrivées à maturité et prêtes à être cueillies [1].

I.5. Vertus et usage

La coriandre est un ingrédient commun dans la médecine grecque et ses propriétés sont reconnues par Hippocrate.

- Stimulante et tonique.
- Très bon pour système digestif : évite flatulences, apéritive, favorise la sécrétion des sucs gastriques, contre certaines coliques, stomatique, carminative, digestive.
- Cataplasmes de graines contre articulations douloureuses et les rhumatismes.
- Contre les névralgies.
- Aphrodisiaque.
- Sédatif (graines).
- Antibactérienne.
- Contre l'ulcération de la peau, et muqueuses [2].
- Antispasmodique.
- Bactéricide.
- Combat les intoxications intestinales.
- Diminue le mal de dent [1].

La coriandre peut, dans certains cas, provoquer des allergies.

Et elle peut être utilisée en cosmétique comme :

- Fragrances.
- Déodorant naturel.
- Un produit de soin de peau.
- Huile de bain et de massage [5].

Toute la plante est comestible : feuilles, graines et même la racine. Celle-ci, râpée apporte un parfum de coriandre en plus subtil.

La coriandre est très utilisée dans la cuisine, Les feuilles fraîches s'utilisent comme le persil dans les salades, les sauces, etc.

Les graines sont très aromatiques, sucrées, avec un arrière-goût qui rappelle le zeste de l'orange. Elle dégage une agréable odeur de sauge et de citron qui conquiert plus facilement nos papilles occidentales.

La racine peut être écrasée et utilisée à défaut d'ail ou en combiné. Elle s'accommode facilement des plats mijotés longtemps.

L'huile obtenue par distillation parfume de nombreuses liqueurs dont l'Eau de mélisse, l'Eau des Carmes, la Chartreuse et l'Izarra et, on la retrouve parfois dans le cacao de qualité inférieure pour en augmenter le goût.

Valeur nutritive (pour 15 ml ou 1 c. à soupe)

- Fer: 0,07mg
- Vitamine C: 10 mg [1]

I.6.Composition chimique

- Feuilles
 - Aldéhydes (goût d'herbe) : trans-2-tridécenal, décanal
 - 0.1% d'huile essentielle
 - riche en vitamine A B C
 - Fer
- Graines
 - <1% d'huile essentielle
 - 50-60% d-Linalool
 - 20% terpènes divers (pinènes, gamma-terpinène, myrcène, camphène, phéllandrènes, alpha terpinène, limonène, cymène)
 - acétyl linalol

Le **tableau I.1** donne la composition des différentes familles chimiques, elle a été donnée par GILDEMEISTER & HOFFMANN en 1931 [6].

Tableau I.1 : composition de l'extrait de coriandre donnée par Gildemeister & Hoffmann en 1931.

Composés	pourcentage
<i>Eau</i>	11.37
<i>Protéines</i>	11.49
<i>Huile gras</i>	19.15
<i>Fibre</i>	28.43
<i>Amidon</i>	10.53
<i>Pentosane</i>	10.29
<i>Sucre</i>	1.92
<i>Constituants minéraux</i>	4.98
<i>Huile essentielle</i>	0.84

Le **tableau I.2** regroupe la composition de l'huile essentielle de fruits de *Coriandre sativum L* d'Algérie, obtenue par entraînement à la vapeur d'eau [7].

Tableau I.2 : composition de l'huile essentielle de fruits de *Coriandre sativum L* d'Algérie, obtenue par entraînement à la vapeur d'eau.

Composés	Teneurs (%) Huile essentielle d'Algérie
α -pinène	0.1
Myrcène	0.2
p-cimène	0.2
γ -terpinène	0.6
1,8-cinéol	0.1

Linalol	70.2
Camphre	1.8
terpinène4-ol	0.5
α -terpinéol	0.3
Octanal	2.2
Dodécane	0.5
acétate de géranyle	1.6
Dodécanal	0.5
β -caryophilène	0.2
α -humulène	0.8
Nérolidol	0.5
acide myristique	5.9

I.7. Localisation de l'huile essentielle

La biosynthèse des constituants de l'huile essentielle de coriandre, se fait dans deux sortes de canaux (fig I.2.) :

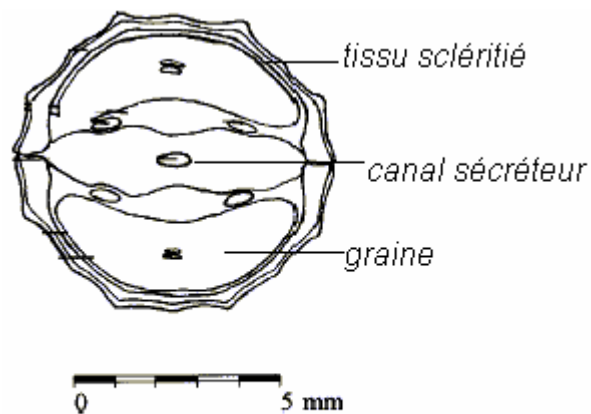


Figure I.1 : Coupe transversal de graine de coriandre.

- Périphériques, disparaissent lorsque le fruit est mûr
- Internes, apparaissent au cours de la maturation

Certains composés oxygènes se forment dans les canaux périphériques, tandis que les alcools et les terpènes sont élaborés dans les canaux internes .L'accumulation du linalol est achevée quand le fruit est mûr.

Principaux symboles et notations utilisés dans le Chapitre II

<i>Symbole</i>	<i>Unité</i>	<i>Définition de la grandeur</i>
D_{moy}	mm	<i>Diamètre moyen</i>
h	m^3/kg	<i>Hudromodule</i>
m_i	g	<i>masse de l'échantillons</i>
R	m	<i>Rayon moyen de la particule</i>
V	m^3	<i>volume de la particule</i>
ρ	kg/m^3	<i>Masse volumique des graines de coriandre</i>

II.1.Extraction solide-liquide

L'extraction solide liquide, encore appelée extraction par solvant, est une opération de transfert de matière destinée à séparer les principes solubles d'un substrat solide par leur diffusion dans un solvant. En règle générale, la phase noble est constituée par la solution d'extrait tandis que la phase insoluble constitue le résidu. [8]

Quel que soient les constituants contenus dans le solide, ceux-ci ne sont jamais totalement insolubles dans un solvant donné et à côté du produit désiré, on entraîne souvent d'autres produits. Il est impossible d'obtenir la séparation d'un seul constituant et ceci quelque soit le solvant utilisé. [9]

L'extraction solide-liquide est réalisée, en principe, par contact intime du solide avec le solvant suivi d'une séparation mécanique de la solution et le solide. Toutefois, une certaine quantité de solution est retenue dans le solide, ce qui oblige parfois à procéder à des lavages ou à l'opération nommée désolvatisation, consistant à chasser, par évaporation, le solvant imbibant le résidu. [9]

L'extraction solide-liquide est une opération de transfert ou d'échange de matière entre deux phases. Ce transfert exige certain temps pour être complet et il est essentiel de déterminer la vitesse globale du phénomène, c'est-à-dire vitesse de transfert ou vitesse d'extraction, pour définir un appareil d'extraction. Cette vitesse d'extraction résultante est régie par trois processus élémentaires de l'échange de matière :

- La dissolution du soluté au sein des particules par le solvant
- La diffusion de la solution
- La diffusion du soluté contenu dans la solution au contact du solide vers la masse restante du solvant [9]

Cette vitesse résultante est régie par trois processus élémentaires de l'échange de matière, mis en évidence par Angelidis, [10] dans le cas de l'extraction solide liquide des oléagineux :

- Imbibition et dissolution de l'huile de surface, qui est une étape rapide, basée sur la théorie du transfert de matière en phase liquide,

- Diffusion de l'huile à l'intérieur des pores ; suivant la dimension de ces derniers : celle-ci pourrait être soit : convective, libre ou empêchée,
- Et enfin, transfert du soluté vers la masse restante du solvant ; cette étape sera influencée par la vitesse d'écoulement du solvant dans les espaces vides restant des pores capillaires. C'est l'étape la plus lente durant laquelle l'écoulement impose la vitesse et non la diffusion.

De plus, l'extraction solide-liquide est influencée, à la fois par des paramètres thermodynamiques (température, pression, débit, ...etc.) et par des paramètres cinétiques (durée de traitement, vitesse de cheminement du solvant à l'intérieur de la matrice du solide,.....etc.). Dans de nombreux cas, le soluté n'est pas distribué de façon homogène dans les pores du solide. Alors qu'une fraction de l'extrait se trouve très accessible, elle est donc extraite en priorité, l'extraction du reste du soluté est limitée à la fois par sa solubilité et sa diffusion dans le solide. [11]

II.1.1.Extraction par solvants volatils

L'extraction par solvant volatil des végétaux consiste à mettre en contact la matière végétale et le solvant. Le solvant pénètre dans le tissu végétal où toutes les substances solubles vont s'y dissoudre. Le solvant chargé appelé (miscella), subit une distillation pour la récupération du soluté et de solvant pur.

Ce procédé d'extraction est, de nos jours, le moyen le plus efficace pour obtenir des huiles végétales et animales. Obtenus dans des conditions moins agressives, les extraits récupérés par cette technique restituent plus fidèlement que les huiles essentielles l'odeur des plantes et la conservent plus longtemps grâce aux antioxydants et aux fixateurs naturels d'odeurs qu'ils renferment. [12]

II.1.2.Facteurs intervenant dans l'extraction solide-liquide [9]

Les principaux facteurs intervenant dans l'extraction solide-liquide sont :

II.1.2.1. Nature et état du solide et du soluté

La nature et l'état physique du solide et du soluté ont une importance déterminante pour le transfert de matière. Le soluté contenu dans ces corps est réparti plus ou moins régulièrement à des teneurs variables dans le solide.

Au début de l'extraction, le solvant dissout le soluté situé à la surface, en laissant un solide poreux. Il pénètre ensuite cette couche extérieure avant d'atteindre le soluté situé en profondeur. Son cheminement devient de plus en plus difficile et se traduit par une diminution de la vitesse d'extraction.

Le soluté dans les matières végétales est généralement occlus dans des cellules d'où il est extrait par un mécanisme de dialyse ou de diffusion capillaire à travers les parois cellulaires.

II.1.2.2. Nature du solvant [9,13]

Le choix du solvant d'extraction doit tenir compte des critères suivants :

- être sélectif, par rapport aux produits à extraire,
- posséder une grande capacité de dissolution
- avoir une température d'ébullition peu élevée, pour éviter toute dégradation des constituants thermolabiles,
- être non toxique, ininflammable et non explosif,
- avoir une volatilité élevée, pour éviter les opérations d'évaporation,
- avoir une faible viscosité et une masse volumique peu élevée, pour faciliter la diffusion, l'agitation et la séparation mécanique,
- être disponible et peu coûteux,

Les principaux solvants utilisés sont l'eau, les alcools (méthanol, éthanol), et de moins en moins les hydrocarbures (hexane) et les solvants halogénés.

II.1.2.3. Température

L'élévation de la température permet généralement l'accroissement de la solubilité et de la diffusivité du soluté et la diminution de la viscosité de la solution. Elle est limitée par les risques d'extraire des composés nuisibles, et par les risques de dégradation thermique du soluté.

II.1.2.4. Degré d'agitation

L'agitation mécanique des particules dans le solvant qui permet leur maintien en suspension et l'homogénéisation du milieu à un effet toujours favorable sur l'opération d'extraction.

II.1.2.5. Taux d'humidité du solide

Lors de l'utilisation de solvants hydrophobes, la diffusivité varie inversement avec la teneur en eau du solide.

II.1.2.6. Durée d'extraction

Il est conseillé d'arrêter l'extraction à l'instant où le rendement en produit de meilleure qualité soit maximal.

II.1.2.7. Hydromodule

L'hydromodule, h , est le rapport entre le volume du solvant et la masse de solide à extraire. Il est exprimé en m^3/kg .

L'augmentation de l'hydromodule crée un gradient de concentration du soluté dans les deux phases, favorisant ainsi sa diffusion vers la phase liquide. Toutefois, au-delà de certaines valeurs, son influence est peu significative vu que dans ces conditions, la diffusion du soluté ne pouvant pas être freinée par une saturation de la phase liquide où un gradient de concentration insuffisant entre les deux phases.

II.2. Définition des systèmes solide-liquide étudiés

II.2.1. La phase solide

La phase solide étudiée est constituée de graines de coriandre achetées sur le marché local et provenant de la région de Sétif dans le Nord-Est algérien.

Le lot de graines a subi au préalable un échantillonnage selon la méthode d'usage [13], dans le but d'utiliser des échantillons représentatifs de la population mère pour l'ensemble des essais d'extraction.

II.2.1.1 Théorie d'échantillonnage

Nous souhaitons toujours, en pratique, pouvoir tirer des conclusions valides à propos de groupes étendus ou d'objets. Au lieu de considérer le groupe en entier, dit population, nous sommes conduits à n'envisager qu'une petite partie de celui-ci que nous appelons échantillon. Nous le faisons dans le but d'établir certains faits concernant la population, à partir de résultats obtenus en étudiant l'échantillon ; c'est le procédé d'inférence statistique et le processus de choix de l'échantillon ou l'échantillonnage.

Afin que les conclusions de la théorie de l'échantillonnage et de l'inférence statistique soient valables, les échantillons choisis doivent être représentatifs de la population.

Pour obtenir un échantillon représentatif, on procède à un échantillonnage aléatoire, ce qui revient à considérer que chaque élément de la population a la même chance d'appartenir à un échantillon donné. [13]

II.2.1.2. Procédure

Prenons une masse de matière végétale contenant des graines dont la granulométrie n'est pas toujours homogène. Lors de leur conditionnement, ces graines vont se répartir par ordre de masse et de diamètre de façon à ce que les grosses se mettent en haut, les petites avec la poudre en bas et les moyennes au milieu.

Pour avoir une masse ou un échantillon représentatif, qui regroupe les différents diamètres de graines et en se basant sur la théorie de l'échantillonnage décrite précédemment, on doit tout d'abord homogénéiser la masse globale, puis procéder à l'échantillonnage de la façon suivante :

- Tracer sur un papier de grandes dimensions, un carré et verser sur sa surface la masse globale de graines de coriandre bien mélangée,
- Mélanger bien cette masse et l'étaler sur toute la surface du carré,
- Diviser cette masse en deux masses identiques représentant chacune la somme des deux triangles opposés formés par les deux diagonales du carré.
- Prendre l'une des masses et refaire le même travail jusqu'à obtention de la masse voulue. [13]

II.2.1.3. Diamètre moyen et sphéricité des graines

Par le souci de conforter l'hypothèse de la sphéricité des particules solides et l'uniformité de cette géométrie sur laquelle sont basées les méthodes de modélisation utilisées plus loin, nous avons procédé à l'estimation du diamètre moyen sur un échantillon de 100 graines.

Les résultats des mesures montrent une faible variation, l'écart type moyen, dans les deux directions orthogonales de la graine étant estimé à 0,286. La distribution des diamètres moyens est de forme gaussienne avec pour près de 40% de la population se situant à 3,655mm. Ainsi, nous avons prouvé statistiquement que nos graines sont des sphères ayant un diamètre s'écartant très peu de la valeur moyenne de 3,655mm. [14]

II.2.1.4. Détermination de la masse volumique des graines de coriandre[15]

Afin d'évaluer la masse volumique de la graine de coriandre, nous avons pesé trois échantillons de 100 graines chacun et estimé la masse moyenne.

Echantillon 1 : $m_1=1,6558g$

Echantillon 2 : $m_2=1,5361g$

Echantillon 3 : $m_3=1,5670g$

$$m_{moy} = \frac{m_1 + m_2 + m_3}{3} = 1,5863g$$

Ayant trouvé que les graines sont de forme sphérique de diamètre moyen D_{moy} égal à 3,65 mm, nous pouvons calculer le volume V d'une particule par la relation :

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3$$

Pour un rayon de la sphère $R = 0,182cm$, le volume d'une graine est de $2,5 \cdot 10^{-6} m^3$

La masse volumique ρ a été calculée par la relation: $\rho = \frac{m}{V}$ et estimée à $634,5 \text{ Kg/m}^3$.

II.2.3. Le soluté

Le soluté représente l'extrait récupéré après évaporation du solvant. Il renferme les constituants de l'huile essentielle ainsi que d'autres produits solubles dans le solvant tels : les colorants, résinoïdes, cires, acides.....etc. [16]

Plusieurs recherches ont été menées sur les graines de coriandre: l'étude de la composition de son huile essentielle [7], la variation de la composition de l'huile essentielle et son accumulation dans le fruit au fur et à mesure de sa maturation [17] ou bien la modélisation de transfert de matière lors de l'extraction par solvant méthanol [16], éthanol et binaire [4]

Nous allons citer les travaux dont nous avons utilisé les résultats expérimentaux dans l'élaboration de ce projet.

III.1. Etude cinétique de l'extraction des essences des graines de coriandre réalisée dans différentes conditions opératoires [16]

Les principales conclusions de cette étude se résument comme suit:

1. Le rendement en extrait augmente avec l'augmentation de l'hydromodule, car cette dernière crée un gradient de concentration important
2. La température n'a pas d'influence durant la première heure d'extraction, ceci est dû au fait que l'étape limitante du processus n'est pas le transfert de matière mais l'écoulement du fluide le long de l'extracteur. Au-delà de la première heure d'extraction, le rendement augmente avec la température, du fait que l'accroissement de la température, favorise la solubilité du soluté dans le solvant et améliore les propriétés diffusionnelles du soluté et du solvant.
3. L'augmentation du taux d'humidité des graines influe positivement sur le rendement en extrait. Ceci peut être expliqué par le fait que l'ajout de l'eau faisant éclater les cellules intérieures du solide sans en modifier l'aspect extérieur, faciliterait le cheminement du soluté vers l'extérieur du solide. On peut dire aussi que le taux d'humidité augmente, également, la concentration initiale donc, elle augmente la concentration d'équilibre.
4. L'agitation a une action favorable sur le rendement en extrait, qui pourrait être attribuée à une dispersion du milieu et, à la réduction l'épaisseur de la couche liquide entourant le solide.

En outre, les équations des courbes cinétiques, donnant l'évolution de la concentration du soluté en fonction du temps, correspondant aux différents taux d'humidité, ont été utilisées pour le calcul de l'expression de la fonction standard et la détermination du coefficient de diffusion. Le tableau III.1 regroupe ces résultats.

Tableau III.1: Valeurs du coefficient de diffusion apparent calculées à partir de la fonction standard pour différents taux d'humidité des graines de coriandre.

<i>H, %</i>	<i>R, mm</i>	<i>C_t(t), Kg/m³</i>	<i>Φ*(t)</i>	<i>D_a, m²/s</i>
7.0	$1.822.10^{-3}$	$6.58 - 4.83 e^{-0.0083.t}$	$1.003 - 0.885e^{-0.00366.t}$	$2.99.10^{-11}$
15.0	$1.845.10^{-3}$	$8.37 - 4.78 e^{-0.0121.t}$	$1.002 - 0.748e^{-0.00716.t}$	$5.06.10^{-11}$
17.2	$1.852.10^{-3}$	$8.50 - 4.24 e^{-0.0124.t}$	$1.002 - 0.687e^{-0.00778.t}$	$5.09.10^{-11}$
27.9	$1.884.10^{-3}$	$8.35 - 3.45e^{-0.0132.t}$	$1.002 - 0.622e^{-0.00855.t}$	$5.24.10^{-11}$
29.9	$1.90.10^{-3}$	$7.99 - 3.09 e^{-0.0134.t}$	$1.002 - 0.608 e^{-0.00859.t}$	$5.24.10^{-11}$

III.2.Détermination du coefficient de diffusion lors de l'extraction des graines de coriandre par le méthanol [17]:

Les auteurs ont constaté, lors de l'extraction au méthanol des graines de coriandre, que la concentration du soluté dans la phase liquide augmentée avec la diminution du diamètre moyen des particules solides en raison de l'augmentation de la surface d'échange.

III.3. Détermination du coefficient de diffusion lors de l'extraction des essences des graines de coriandre par l'éthanol et le binaire éthanol-eau à 75 % en éthanol [4]

La cinétique d'extraction en charge dispersée par chacun des deux solvants a été suivie jusqu'à l'établissement de l'équilibre dans le système

La modélisation du transfert de matière des systèmes solide liquide étudiés, par deux méthodes ont été effectuées par: la résolution analytique des équations de transfert de matière et la résolution numérique par le logiciel «EXDIF», qui ont permis de déterminer le coefficient de diffusion apparent global et celui des temps courts.

Les résultats sont présentés dans les tableaux **III.2** et **III.3**

Tableau III.2. Coefficients de diffusion déterminés par EXDIF

Coefficient de diffusion (m²/s)	Ethanol	Binaire ethanol-eau
Global	2,45 10⁻¹²	1,89 10⁻¹²
Temps courts	2,46 10⁻¹²	2,18 10⁻¹²

Ces résultats montrent que pour le système graines de coriandre-éthanol, le coefficient de diffusion est constant que l'on s'intéresse au début de l'extraction ou au voisinage de l'équilibre. Ce résultat vient conforter l'hypothèse de la constance du coefficient de diffusion au cours du processus d'extraction. Par contre, dans le cas du binaire nous observons une faible variation du coefficient de diffusion en considérant les temps courts et l'ensemble du domaine. Ceci pourrait être en relation avec le fait que dans ce cas, nous avons remarqué l'existence d'un palier intermédiaire traduisant une cinétique s'effectuant en deux étapes.

Tableau III.3. Coefficients de diffusion déterminés par la méthode analytique

paramètres	Ethanol	binaire
D temps longs, (m²/s)	2,49.10⁻¹²	2,01.10⁻¹²
D temps courts, (m²/s)	2,26.10⁻¹²	2,78.10⁻¹²

Ces résultats montrent que le coefficient de diffusion est du même ordre de grandeur pour les deux systèmes. Dans le cas de l'éthanol les valeurs des coefficients de diffusion obtenues par les deux modèles sont comparables, aussi bien pour les temps courts que pour les temps longs. Par contre, une différence est constatée entre les résultats des deux modèles dans le cas de l'extraction avec le binaire. Ceci est dû au fait que, dans le premier modèle « EXDIF », on considère α' comme infini alors que dans le second modèle ce paramètre est déterminé et, il est tenu en compte pour l'évaluation du coefficient de diffusion.

Comme pour le premier modèle, la valeur du coefficient de diffusion correspondant aux temps courts est supérieur à celui obtenu pour des temps longs, dans le cas de l'extraction par le binaire, ce qui a été attribué à une cinétique s'effectuant en deux étapes dans ce cas.

III.4 Modélisation du transfert de matière lors de l'extraction des essences des graines de coriandre par l'éthanol. [15]

Comme lors de l'étude précédente, l'extraction a été menée jusqu'à l'établissement de l'équilibre dans le système.

La modélisation du transfert de matière a été effectuée par trois méthodes:

- Modèle de CRANK pour les temps courts et les temps longs.
- Modèle de P.Mafarat et Ebeliard.
- Par le logiciel EXDIF.

Les résultats relatifs aux coefficients de diffusion et de transfert de matière sont regroupés dans le **tableau III.4.**

Tableau III.4 Valeur des coefficients de diffusion et de transfert de matière

	Coefficient de diffusion au temps court	Coefficient de diffusion au temps long	Coefficient de transfert de matière
Modèle I	$2,98 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$4,96 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,40 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
Modèle II	—	$4,66 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,40 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
EXDIF	$3,04 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$4,67 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,40 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

On remarque qu'au voisinage de l'équilibre tous les modèles conduisent à des valeurs proches du coefficient de diffusion, de même pour les coefficients de transfert de matière en phase solide.

Concernant le coefficient de diffusion pour les temps courts, que ce soit pour une valeur de α finie (1^{er} modèle) ou infinie (exdif), on aboutit pratiquement à la même valeur du coefficient de diffusion de l'ordre $3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

La différence entre les coefficients de diffusion temps court et temps long, nous laisse supposer que ces valeurs sont influencées par la concentration du soluté dans le solide.

Les principaux symboles et notations utilisés dans le chapitre IV

<i>Symboles</i>	<i>Unité</i>	<i>Signification physique</i>
A	m^2	surface d'échange
C_0	kg/kg_{Solide}	Teneur initiale de soluté dans le solide
$C_l(t)$	$kg/kg_{Liquide}$	Concentration de soluté dans la phase liquide à l'instant t
$C_s(t)$	kg/kg_{Solide}	Concentration de soluté dans le solide à instant t
$C_s(\infty)$	kg/kg_{Solide}	Concentration de soluté dans le solide à l'équilibre
$C_l(\infty)$	$kg/kg_{Liquide}$	Concentration de soluté dans la phase liquide l'équilibre
D	m^2/s	Coefficient de diffusion
h	m^3/kg	hydromodule
J_i	$mol.m^{-2}.s^{-1}$	Densité du flux de diffusion
K	s^{-1}	Coefficient de transfert de matière
m	—	Coefficient de partage
N_i	$mol.m^{-2}.s^{-1}$	Densité du flux de transfert
T_i	$mol.m^{-2}.s^{-1}$	Densité du flux de transport
t	s	temps
v_i	m/s	Vitesse de déplacement d'un constituant i
V_l	m^3	Volume de la phase liquide
ρ_s	kg/m^3	Masse volumique du liquide

IV.1.Présentation du 1^{er} modèle (Crank) [15]

Le modèle que nous allons présenter est basé sur le mécanisme de transfert de matière d'une phase solide vers une solution parfaitement agitée.

Le soluté à extraire est renfermé à l'intérieur des particules solides qui ont une forme sphérique, et supposé uniformément réparti.

Afin de décrire le processus de transfert de matière, nous utiliserons plusieurs hypothèses simplificatrices:

- Les particules solides sont assimilées à des sphères de distance radiale caractéristique R , et reste constante durant l'extraction,
- La masse volumique du solide reste constante durant toute l'opération d'extraction,
- La température est constante,
- L'extrait sera considéré comme un soluté unique ayant des propriétés physiques et diffusionnelles moyennes, [19]
- La répartition initiale du soluté dans le solide est considérée comme étant uniforme,
- A l'interface l'équilibre thermodynamique est atteint quasi-instantanément
- En prenant en considération la symétrie du problème, la concentration du soluté ne dépend que de la variable spatiale (r) et du temps [20].
- Le solvant est parfaitement agité, d'où une résistance au transfert côté liquide négligeable, et la vitesse de processus d'extraction est régie uniquement par la diffusion dans le solide.

IV.1.1.Bilan de matière

Soit un système quelconque, et soit i l'espèce à laquelle nous nous intéressons et v_i sa vitesse de déplacement.

La densité du flux de transfert de constituant i est donnée par la relation suivante :

$$N_i = J_i + T_i \quad (\text{III.1})$$

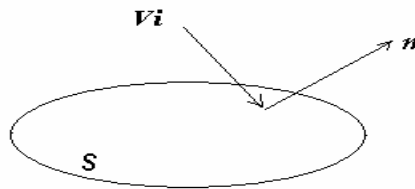
$$N_i = -D \text{grad}(C_i) + C_i v \quad (\text{III.2})$$

où J_i représente la densité de flux de diffusion, T_i la densité de flux de transport, C_i la concentration du constituant i .

La vitesse moyenne locale v de l'écoulement est exprimée par la relation suivante :

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n C_i v_i}{\sum_{i=1}^n C_i}$$

Isolons un volume (V) du solide, limité par une surface S invariante dans le temps et soit n le vecteur unitaire de la normale à la surface orientée vers l'extérieur.



FigureIV.1. Volume V du solide

Le bilan de matière s'écrit alors :

$$E - S \pm R = A \quad (\text{III.3})$$

où E : flux entrant ;

S : flux sortant ;

R : génération (+), disparition (-) ;

A : accumulation.

Or

$$E - S = -\int_S n(C_i v_i) dS \quad (\text{III.4})$$

En supposant qu'il n'y ait pas de réaction chimique ($R=0$)

$$A = \int_v \frac{\partial C_i}{\partial t} dV \quad (\text{III.5})$$

L'équation de bilan devient :

$$\int_s n C_i v_i dS = \int_v \frac{\partial C_i}{\partial t} dV \quad (\text{III.6})$$

En remplaçant l'intégrale de surface par l'intégrale de volume par application du théorème de Green Ostrogradsky, l'équation s'écrit :

$$- \int_v \text{div}(C_i v_i) dV = \int_v \frac{\partial C_i}{\partial t} dV \quad (\text{III.7})$$

Ou encore

$$- \text{div} N_i = \frac{\partial C_i}{\partial t}$$

Dans le cas, où le déplacement de i dû à la diffusion seule, l'équation s'écrit :

$$- \text{div}(D \text{grad} C_i) + \frac{\partial C_i}{\partial t} = 0 \quad (\text{III.8})$$

IV.1.2.L' équation de continuité dans le cas d'une sphère

Soit C la concentration de l'espèce diffusante. En coordonnées sphériques r , θ et φ , et en absence de réaction chimique, l'équation de continuité s'écrit :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(D r^2 \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(D \sin \theta \frac{\partial C}{\partial \theta} \right) + \frac{D}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 C}{\partial \varphi^2} \right) \quad (\text{III.9})$$

Si on admet, que le coefficient de diffusion est indépendant des coordonnées spatiales et que la diffusion est radiale l'équation (III.9) devient :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (\text{III.10})$$

En posant

$$u = r \cdot C \quad (\text{III.11})$$

Nous aboutissons à la relation suivante:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \quad (\text{III.12})$$

IV.1.3. Conditions aux limites

Compte tenu de modèle que nous proposons et des conditions expérimentales dans lesquelles nous nous sommes placées, les conditions aux limites sont traduites par les relations suivantes :

- A l'état initial

$$t=0 \quad \forall r \quad C_s(r,0) = C_{s0} \quad \text{et} \quad C_l(0)=0$$

- Au centre de la particule la concentration du soluté est maximale du fait de la symétrie :

$$r = 0 \quad \forall t > 0 \quad \frac{\partial C_s(t,0)}{\partial r} = 0$$

- A l'interface, il y a un équilibre des concentrations :

$$C_s(t,r) = m C_l(t) \quad \text{où } m \text{ est le coefficient de partage}$$

- A l'interface nous considérons l'égalité des débits massiques du soluté sortant des pores du solide et entrant dans la phase liquide.

$$r = R \quad \forall t \quad -D_s \frac{\partial C_s}{\partial r} = \frac{\partial C_l}{A \partial t}$$

IV.1.4. Résolution des équations de transfert de matière

Le système d'équations développé précédemment peut être résolu par différentes méthodes :

- la méthode de séparation des variables

- transformée de Laplace
- méthode des différences finies

Plusieurs solutions ont été rapportées dans la bibliographie [18] selon le sens de transfert et le domaine du temps. Au voisinage de l'équilibre on parlera de temps longs et au début du processus, c'est-à-dire, bien loin de l'équilibre, on parlera des temps courts.

Parmi les solutions proposées de l'équation de transfert de matière, nous citons :

1- la solution générale pouvant être appliquée quelque soit le sens de transfert du soluté : de la solution vers une sphère initialement exempte de soluté ou de la sphère vers un solvant initialement pur :

$$\frac{C_s(t)}{C_s(\infty)} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6(1+\alpha)e^{-Dq_n^2 t/R^2}}{9+9\alpha+q_n^2 \alpha^2} \frac{R}{r} \frac{\sin(q_n r/R)}{\sin q_n}$$

2- la solution correspondante au transfert dans le sens liquide \longrightarrow solide dans les temps longs :

$$\frac{C_s(t)}{C_s(\infty)} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6\alpha(\alpha+1)e^{-Dq_n^2 t/R^2}}{9+9\alpha+q_n^2 \alpha^2} \quad (\text{IV.14})$$

$$\tan q_n = \frac{3q_n}{3 + \alpha q_n^2}$$

Où α est donné par l'équation :

$$\frac{C_{s\infty}}{V_l C_{l0}} = \frac{1}{1 + \alpha}$$

$$\text{Ou} \quad \alpha = \frac{V_l m}{\frac{4}{3} \pi R^3} \quad \text{et} \quad m = \frac{C_l(t_\infty)}{C_s(t_\infty)}$$

La solution correspondante pour les temps courts est donnée par

$$\frac{C_s(t)}{C_s(\infty)} = 6 \left(\frac{Dt}{R^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \pi^{-\frac{1}{2}} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \operatorname{ierfc} \frac{nR}{\sqrt{Dt}} \right\} - 3 \frac{Dt}{R^2} \quad (\text{IV.15})$$

On négligeant le deuxième terme du second membre devant sa racine et l'apport de la série l'équation (III.15) s'écrit donc :

$$\frac{C_s(t)}{C_s(\infty)} = 6 \left(\frac{Dt}{R^2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \quad (\text{IV.16})$$

La solution correspondant au transfert dans le sens solide \longrightarrow liquide :

$$\frac{C_s(t)}{C_s(\infty)} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6(1+\alpha') e^{-Dq_n^2 t/R^2}}{9+9\alpha'+q_n^2 \alpha'^2} \quad (\text{IV.17})$$

Pour $r=R$

Où α' est définie par la relation suivante

$$\frac{3C_s}{4\pi R^3 C_0} = \frac{1}{1+1/\alpha'}$$

On utilisera le logiciel nommé EXDIF qui utilise la même solution précédente en faisant tendre α' vers l'infini mais en tenant compte de l'ensemble des termes de la somme.

$$\frac{C(t)}{C(\infty)} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-Dq_n^2 t/R^2}}{n^2} \quad \text{IV.18}$$

IV.1.5. Programme de calcul du coefficient de diffusion à partir de mesures expérimentales EXDIF[21]

Ce logiciel est un programme de régression qui permet de modéliser la diffusion à partir de mesures expérimentales et de calculer rapidement le coefficient de diffusion. Bien que les solutions analytiques des différentes équations différentielles décrivant les processus de diffusion sont connues et décrites dans de nombreux livres de références, il est souvent difficile d'extraire le coefficient de diffusion à partir de mesures expérimentales. Généralement, l'expérimentateur doit développer son propre logiciel pour obtenir le coefficient de diffusion D . Ce programme est conçu comme outil scientifique pour les personnes actives dans la détermination des propriétés de diffusion des molécules dans les

matériaux. Il peut faciliter l'analyse des mesures expérimentales de diffusion obtenues par des méthodes standard.

IV.2.Présentation du 2^{ème} modèle [8]

La représentation de ce modèle repose sur le fait que le transfert de matière s'effectue par convection dans la phase liquide a cause du mouvement d'agitation .par bilan de matière en écrit que :

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = -kA(C_s - C_l)$$

\dot{m} : Débit massique de transfert du soluté (kg/kg s).

A : aire d'échange de la phase solide (m²).

C_s : Concentration de la phase solide en soluté (kg/kg)

C_l : Concentration de la phase liquide en soluté (kg/kg)

k : coefficient global de transfert de matière. (s⁻¹ m⁻²)

Si l'on considère que le volume de la phase solide ne varie pas la variation de concentration de cette phase en soluté est proportionnelle à sa variation de masse et l'on peut écrire :

$$\frac{dC_s}{dt} = -k' A(C_s - C_l) \quad (\text{III.a})$$

Les constant k' et A étant pratiquement impossibles à déterminer séparément, autant les globaliser en une seule constant $K = k' A$, dès lors

$$\frac{dC_s}{dt} = -K(C_s - C_l) \quad (\text{IV.b})$$

Il est difficile de déterminer dans ces différentes étapes laquelle constitue le facteur limitant la vitesse d'extraction.

Ce facteur limitant varie d'un produit a un autre, et peut changer en fonction notamment de la taille des particule, même a l'intérieure d'un même produit .selon Huige et Westermann (1975) qui se sont intéressées à l'extraction du malt de brasserie, la dispersion du soluté dans le solvant est très rapide et ne constitué jamais le facteur limitant. Néanmoins dans le cas de l'extraction du sucre de betteraves, le facteur limitant réside dans la diffusion du saccharose a travers la couche limite d'écoulement laminaire de l'eau d'extraction appliquée à la surface des cossette. Meddings et Potter (1971) cités par Huige et Westermann (1975) montre que lors du brassage, l'étape limitant la vitesse d'extraction étaient la "saccharification" de l'amidon et

la diffusion des sucres soluble vers l'extérieure des particule lorsque celle-ci sont de taille réduite . Au contraire, dans le cas des grosse particule, le facteur limitant se trouve dans la diffusion de l'eau de brassage, à l'intérieur des particules. [8]

IV.2.1 Hypothèses simplificatrices

Les calculs qui suivent implique les hypothèse suivantes :

- ❖ La phase initiale achevée, on se trouve on phase de diffusion.
- ❖ Le processus limitant est le celui de la diffusion et non de la solubilisation.
- ❖ Le coefficient de partage du soluté entre la phase solide et la phase liquide te égale à l'unité.
- ❖ La perte de masse de la phase solide consécutive a la diffusion de métier sèche est compense par un gain de masse équivalent de solvant migrant dans la phase solide.

IV.2.2.Développement mathématique

Soient C_s et C_l les concentrations (en masse par masse) d'un soluté respectivement dans la phase solide et la phase liquide.

Conformément à ce que nous avons écrie dans (IV.b) :

$$dC_s = -K(C_s - C_l)dt \quad (\text{IV.c})$$

Soient « M » la masse totale de la suspension et « s » la masse de la phase solide rapportée à la masse totale de la suspension.

« C_0 » la concentration initiale de soluté dans la phase solide, un bilan matière permet d'écrire :

$$sMC_0 = sMC_s + (1-s)MC_l \quad (\text{IV.d})$$

D'où l'on tire :

$$C_l = \left[\frac{s(C_0 - C_s)}{1-s} \right] \quad (\text{IV.e})$$

La combinaison des équations (IV.c), (IV.d) et (IV.e) donne:

$$\begin{aligned} dC_s &= -K \left[C_s - \frac{s(C_0 - C_s)}{1-s} \right] dt \\ &= -\frac{K}{1-s} (C_s - C_0) dt \end{aligned}$$

Et

$$\int_{C_0}^{C_s} \frac{dC}{C_s - sC_0} = \ln \left[\frac{C_s - sC_0}{C_0(1-s)} \right] = -\frac{K}{1-s} t \quad (\text{IV.f.1})$$

Donc on aura :

$$C_s(t) = C_0 \left[s + (1-s) * e^{-\left(\frac{K}{1-s}\right)t} \right] \quad (\text{IV.f.2})$$

L'équation permet d'en déduire l'évolution au cours du temps de la concentration en soluté de l'extrait liquide :

$$C_s(t) = sC_0 \left[1 - e^{-\left(\frac{K}{1-s}\right)t} \right] \quad (\text{IV.g})$$

Cette équation est vérifiée expérimentalement et peut s'écrire sous la forme la plus condensée

$$C(t) = C(\infty)(1 - e^{-\lambda t}) \quad (\text{IV.h})$$

A la fin, il suffit de déterminer la courbe expérimentale et la valeur de $C_i(\infty)$ pour en déduire, par calcul, la valeur de λ qui n'est d'autre que $\frac{K}{1-s}$.

IV.2.3.Relation entre α et s

La relation entre α le paramètre du 1^{er} modèle et s la masse de la phase solide rapportée à la masse totale de la suspension est donnée par la relation suivante $\frac{M_{s\infty}}{M_{t0}} = \frac{1}{1+\alpha}$ et on a que

$$sMC_0 = sMC_s(t) + (1-s)MC_i(t) \quad (\text{VI.j})$$

Pour $m=1$ qui sera vérifiée dans le paragraphe suivant on a que $C_{s\infty} = C_{i\infty}$ on aura $sC_0 = C_{s\infty}$ comme les concentrations sont en kg/kg on pourra écrire que :

$$\frac{sC_0}{C_0} = \frac{1}{1+\alpha}$$

Donc on aura la relation suivante entre s et α :

$$\left[\alpha = \frac{1-s}{s} \right] \quad (\text{IV.i})$$

IV.2.4.Relation entre D et K [15]

Les équation IV.16 et IV.17 donnent la possibilité de trouver une relation entre le coefficient de diffusion et le coefficient de transfère de matière du 1^{er} et 2^{eme} modèle respectivement, mais il ne faut pas oublier que l'équation IV.16 est valable pour les temps courts et que l'équation IV.17 est valable pour les temps long par contre pour le 2^{eme} modèle il est valable pour tout le domaine du temps.

La discontinuité du domaine de temps dans les solution des équations différentielles du 1^{er} modèle nous ramène à trouver deux coefficients de diffusion l'un pour les temps long et l'autre pour les temps courts .donc en se base sur le principe de conservation de matière appliqué au transfert du soluté de la particule solide vers le solvant, nous obtenons la relation suivante :

A l'interface $r=R$:

$$\begin{array}{l} \text{Le flux de transfert de matière par convection} \\ \text{(Phase liquide)} \end{array} = \begin{array}{l} \text{le flux de transfert de matière par diffusion} \\ \text{(Phase solide)} \end{array}$$

Pour les temps long on faisant l'égalité précédente pour les équation (VI.17)/ ρ et IV.g on aura pour t tend vers l'infinie :

$$D = \frac{KR^2}{q_1^2(1-s)} \quad (\text{IV.h})$$

V.1. Données expérimentale

V.1.1. Description de l'appareillage

Le dispositif expérimental utilisé lors de l'extraction en charge dispersée est schématisé sur la figure V.1 Il est composé d'une plaque d'agitation magnétique, d'un bain thermostaté où est placé un ballon à deux cols, muni d'un barreau magnétique. Le premier col est surmonté d'un réfrigérant à reflux, tandis que le second sert à effectuer des prélèvements, à l'aide d'une seringue, des fractions de la phase liquide au cours de l'extraction.

V.1.2. Protocole expérimental .

L'ensemble des essais d'extraction en charge dispersée des graines de coriandre par solvant volatile (méthanol ou éthanol), on été réalisé à une température de 25°C, un hydromodule de 0.003 m³/kg (300 ml de solvant pour 100g de matière végétale) un taux d'humidité des graines de coriandre de 7%, pendant une durée d'extraction de 72 heures. Des prélèvements séquentiels sont effectués à des intervalles du temps de 15mn, 30mn, 60mn, 120mn, 24h, 6h, puis tous les 24h, en relevant des volumes de 2ml pour éviter une variation sur l'hydromodule qui est évaluée 6% pour l'ensemble des essais.

Les fractions de la phase liquide prélevées sont laissées à l'air ambiant jusqu'à l'évaporation totale du solvant. La concentration $C_l(t)$ du soluté dans la phase liquide a été déterminée à partir de sa masse dans chaque fraction rapportée au volume de celle-ci exprimée en kg/kg_{liquide}.

Deux expériences ont été réalisées avec un hydromodule de 0.003 m³/kg et l'autre avec un hydromodule de 0.01 m³/kg .pour la première expérience α a une valeur finie, alors, que pour la seconde on peut considérer α comme étant infinie

Malheureusement, les résultats obtenus n'ont pas pu être exploités du fait d'un écart important des résultats antérieures, dû probablement à la détérioration des graines suite à un stockage prolongé.

Pour la détermination de la teneur initiale en extrait des graines de coriandre C_0 , on a utilisé le dispositif de l'extraction en lit fixe avec circulation continue de solvant pur en boucle fermée.

V.1.3. Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux qu'on a utilisés sont représentés dans les tableaux suivants.

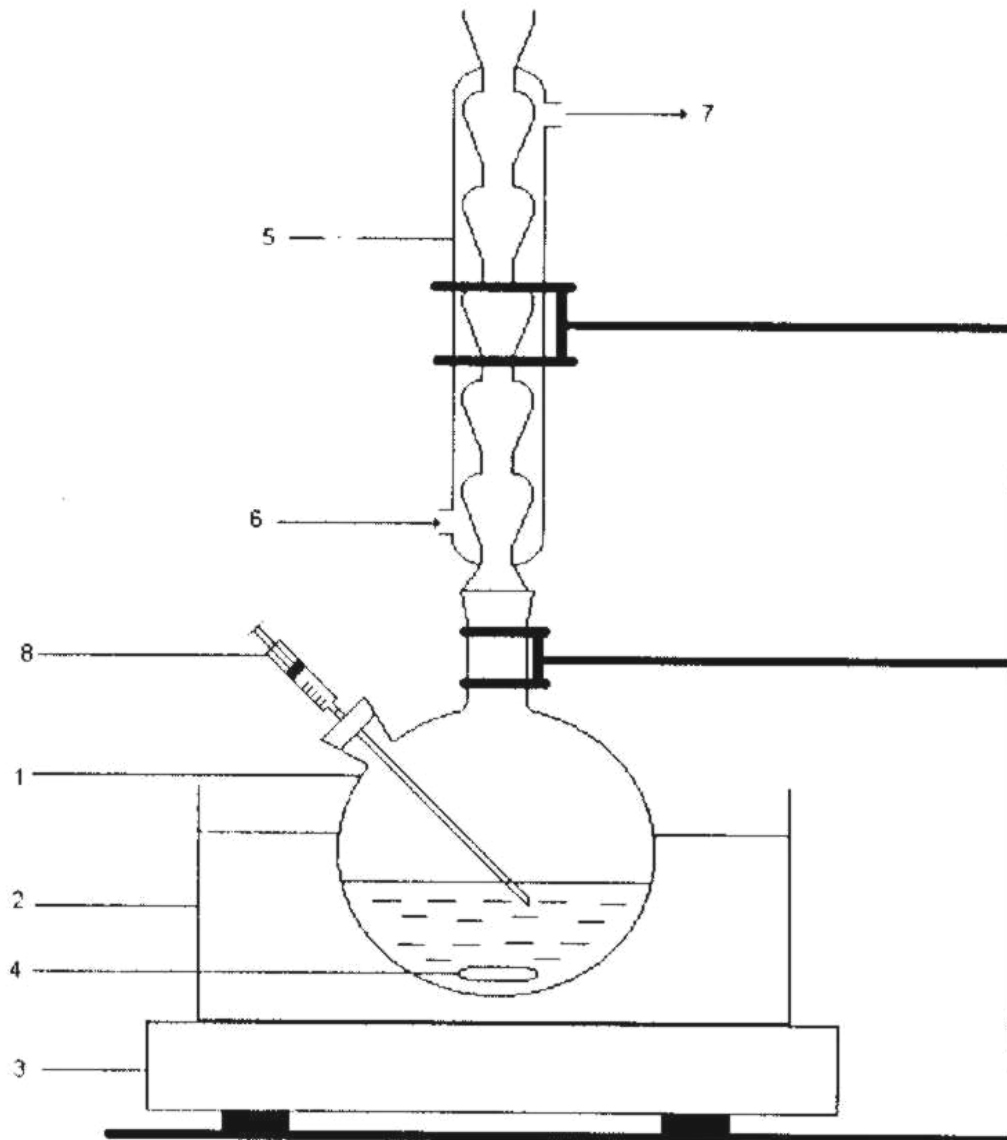


Figure V.1 : Appareillage de l'extraction en phase dispersée.

- 1-Ballon
- 2-Bain thermostaté
- 3-Plaque d'agitation magnétique
- 4-Barreau magnétique
- 5-Réfrigérant
- 6-Entrée d'eau de refroidissement
- 7-Sortie d'eau de refroidissement
- 8-Seringue

Les expériences de Chibane [15] ont été réalisées dans les conditions de 25°C et $h=0.003$ pour un rayon $R=0.0021\text{ m}$

Tableau.V.1.Résultats des expériences de Chibane

t (mn)	$C_1(\text{kg/kg})$ 10^{-3}
0	0
15	1,740
30	2,199
60	2,500
90	2,341
120	3,481
180	4,894
240	5,648
360	6,772
1440	10,552
1800	13,186
2880	14,135
4320	14,599

Pour les différents hydromodules $R=2,1 \cdot 10^{-3}\text{ m}$ et $C_0=0,0537\text{ (kg/kg)}$

Tableau.V.2.Résultats des expériences de Amokrane [14] pour différents hydromodules

h (m^3/kg)	0,003	0,004	0,005
t (mn)	$C_1(\text{kg/kg}) 10^{-3}$		
0	0	0	0
5	1,772	1,089	2,000
10	2,278	1,443	2,760
15	2,594	1,519	3,443
30	3,291	1,848	4,076
45	3,860	2,216	5,000
62,3	4,303	2,342	5,000
90	4,936	2,848	6,013
120	5,063	3,038	7,025
180	6,139	3,602	8,038
240	6,709	4,051	8,734

Tableau.V.3.Rsultats des expériences de Amokrane pour différents taux d'humidité

H (%)	7	15	17	27	29
t,mn	Cl (kg/kg) 10 ⁻³				
0	0	0	0	0	0
5	1,975	4,380	5,367	5,873	5,975
10	2,532	5,114	5,797	6,506	6,608
15	2,886	5,519	6,380	6,810	6,924
30	3,848	6,557	7,266	7,747	7,873
45	4,304	7,342	7,785	7,975	8,025
60	4,937	7,911	8,481	8,924	8,987
90	5,380	8,354	9,114	9,557	9,620
120	6,025	9,177	9,304	9,430	9,494
180	6,835	9,938	10,139	10,253	10,329
240	7,532	10,253	10,506	10,342	10,772
C ₀ (kg/kg)	0,0537	0,05531	0,05591	0,05794	0,0585
R(m) 10 ⁻³	1,825	1,845	1,852	1,884	1,9

V.2Vérification des hypothèses

Les modèles que nous avons proposé, fait appel à diverses hypothèse et qui en pratique ne sont pas toujours vérifiées. Nous nous somme proposé de vérifier la validité de certaine de ces hypothèses.

V.2.1 Le coefficient de partage entre phase égale à l'unité

La détermination du coefficient de partage a été effectuée dans le cas de l'extraction des essences des graines de coriandre par l'éthanol où l'expérience a été menée jusqu'à l'établissement de l'équilibre dans le système. Cet équilibre a été suppose atteint, lorsque la variation de la concentration du soluté dans la phase liquide est de l'ordre de l'erreur expérimentale et évaluée à:

$$C_{l(\infty)} = 0,0146 \text{ kg/kg}_{\text{liquide}}$$

La concentration à l'équilibre dans le solide a été déterminée par un bilan de matière du soluté entre les phases solide et liquide, par l'expression suivante:

$$C_s = \frac{1-s}{s} C_l + C_0$$

Notons que cette expression est valable à toute instant d'extraction. A l'équilibre cette expression s'écrit comme suit:

$$C_s(\infty) = \frac{1-s}{s} C_l(\infty) + C_0$$

La valeur de la concentration dans la phase solide à l'équilibre est de:

$$C_s(\infty) = 0,01464 \text{ kg/kg}_{\text{solide}}$$

Au erreur d'expérience près nous constatons que l'hypothèse que le coefficient de partage égal à 1 est bien vérifiée. Nous pouvons prévoir théoriquement l'évolution de C_s en fonction de C_l . Cette évolution est représentée à la figure.V.1 et simule correctement les résultats expérimentaux.

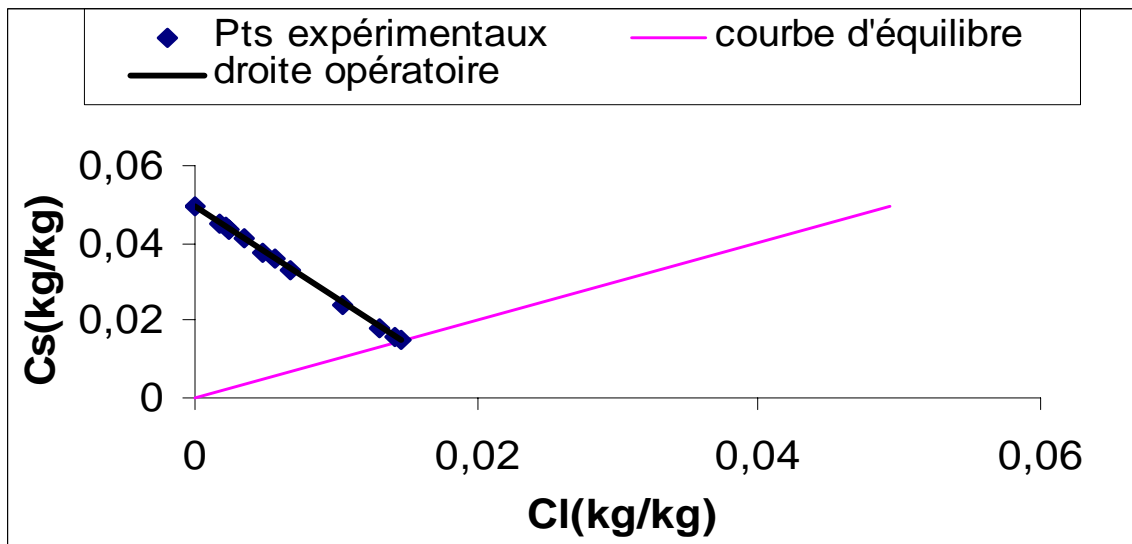


Figure.V.1. Evolution de la concentration dans le solide en fonction de la concentration dans le liquide jusqu'à l'équilibre

V.1.3. La constance du coefficient de diffusion

Le coefficient de diffusion a été déterminé pour le domaine des temps courts et le domaine des temps longs en utilisant les expressions du 1^{er} modèle. Pour affirmer la constance du coefficient de diffusion, les valeurs de ce dernier, obtenues par calcul dans les deux domaines de temps devraient être comparables.

V.1.3.1. Calcul du coefficient diffusion pour les temps courts

En utilisant les équations IV.16 et IV.17 et en prenant $C_l(\infty) = sC_0$, la valeur du coefficient de diffusion pour les temps courts a été déterminée en représentant le rapport $\frac{C_l(t)}{C_l(\infty)}$ en fonction de \sqrt{t} comme montré à la figure.V.2

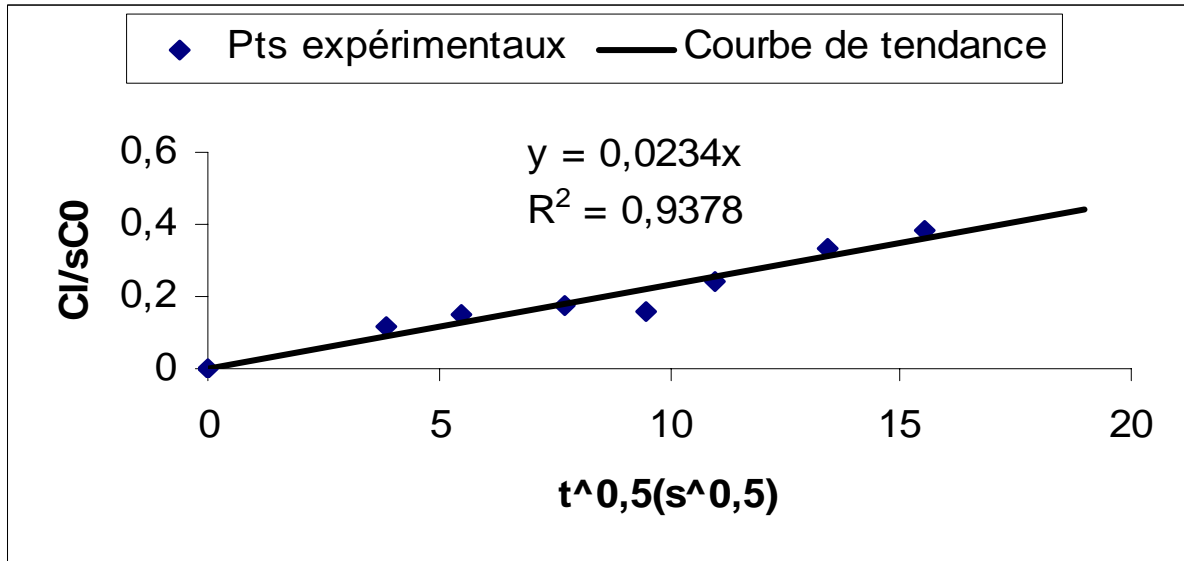


Figure.V.2 Détermination du coefficient de diffusion pour les temps courts par le 1^{er} modèle

La pente de la droite $6\left(\frac{D}{R^2\pi}\right)^{1/2}$ permis le calcul de la valeur du coefficient de diffusion pour les temps courts:

$$D = 3,51 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}.$$

V.1.3.2. Calcul du coefficient diffusion pour les temps longs.

La valeur du coefficient de diffusion pour les temps longs a été déterminée en représentant :

$\ln\left(1 - \frac{C_l(t)}{C_l(\infty)}\right)$ en fonction du temps, comme montré à la figure.V.3

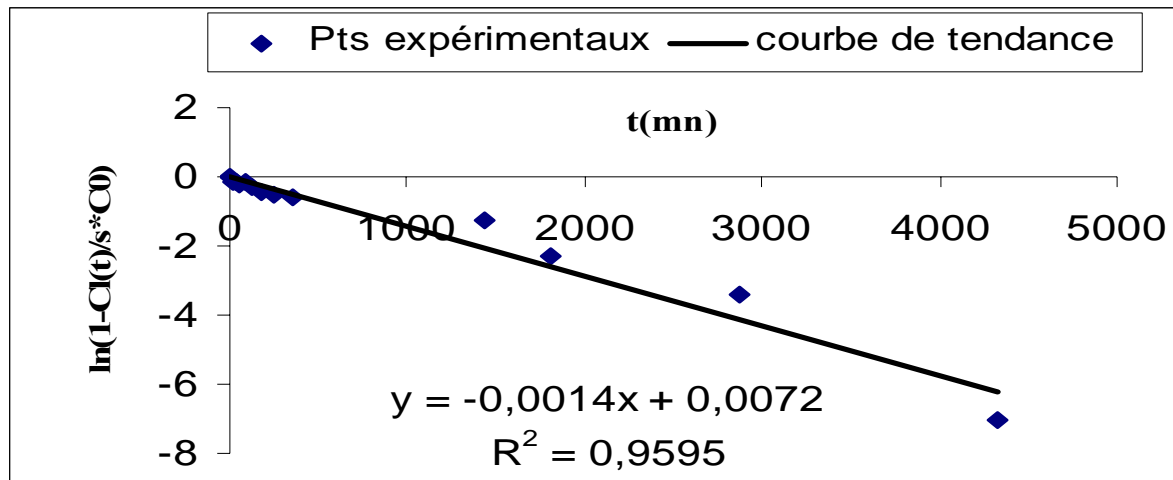


Figure.V.3 Détermination du coefficient de diffusion pour les temps longs par le 1^{er} modèle

La pente de la droite est $-\frac{Dq_1^2}{R^2}$ et son ordonnée à l'origine $\text{Ln}\left(\frac{6\alpha(\alpha+1)}{9+9\alpha+q_1^2\alpha^2}\right)$

La valeur de α donné par la relation $\left[\alpha = \frac{1-s}{s}\right]$ est estimée à 0.4286 et la valeur tabulée de q_1 correspondante 4.0236 ont permis de déterminer la valeur du coefficient de diffusion pour les temps longs:

$$D=6,35 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$$

Tableau V.4. coefficients de diffusion trouvés par le 1^{er} modèle

	Temps court	Temps long
coefficient de diffusion (m^2/s)	$3,51 \cdot 10^{-12}$	$6,35 \cdot 10^{-12}$

On remarque qu'il y a une différence entre les valeurs obtenues pour les temps courts et les valeurs des temps longs. Cette différence est de $\Delta D=2.84 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ donc un écart de 57.6 %. Ces résultats ne confortent pas l'hypothèse considérant le coefficient de diffusion constant durant toute la durée d'extraction. En effet les résultats obtenus sont en accord avec ceux développés dans les travaux de E.H.Benyoussef et col. [22] ainsi que ceux de A.Lalou et col. [23]

V.1.4.Vérification de l'hypothèse α infinie

Pour examiner l'impact de la valeur de α sur le coefficient de diffusion, nous avons résolu d'une part les équations différentielles en utilisant la valeur réelle de α , imposé par les

conditions opératoires et d'autre part, nous avons attribué une valeur infinie au paramètre α . et résolu les équations par le logiciel EXDIF. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau V.3.

Tableau.V.5.Coefficients de diffusion pour les deux valeurs de α

	<i>coefficient de diffusion (m²/s)</i>	
	<i>Temps courts</i>	<i>Temps longs</i>
α fini	$3,51 \cdot 10^{-12}$	$6,35 \cdot 10^{-12}$
α infini (EXDIF)	$3,5210^{-12}$	$5,5110^{-12}$

Il ressort de ces résultats que dans le domaine des temps courts les valeurs du coefficient de diffusion sont comparables pour les valeurs fini et infini de α . Alors, que pour le domaine des temps longs, nous remarquons une diminution de la valeur du coefficient de diffusion due au fait d'avoir suppose α infini. Nous pouvons dire que le fait de supposer α infini alors que les conditions opératoires ne le permettent pas, a pour effet de diminuer la valeur du coefficient de diffusion.

V.2.Proposition d'une méthode de détermination du coefficient de diffusion ne nécessitant pas une étude cinétique

V.2.1. Description de la méthode

Dans cette méthode pour déterminer le coefficient de diffusion, il suffit d'avoir quelques les données suivantes:

- C_0 : la concentration initiale du soluté dans le solide (à l'intérieur des graines).
- h : l'hydromodule qui donne la pente de la droite opératoire par la relation suivante:

$$h = V_{\text{solvant}} / M_{\text{solide}} \quad (\text{V.1}) \quad \text{et} \quad s = \frac{M_{\text{solide}}}{M_{\text{solide}} + V_{\text{solvant}} * \rho_{\text{solvant}}} \quad (\text{V.2})$$

Si on divise la relation (V.2) par V_{solvant} on aura $s = \frac{M_{\text{solide}} / V_{\text{solvant}}}{M_{\text{solide}} / V_{\text{solvant}} + V_{\text{solvant}} * \rho_{\text{solvant}} / V_{\text{solvant}}}$

$$\text{Donc: } s = \frac{1/h}{1/h + \rho_{\text{solvant}}} = s = \frac{1}{1 + \rho_{\text{solvant}} * h}$$

D'autre part, la pente de la droite opératoire est égale a $\lambda = -\frac{1-s}{s} \Rightarrow \lambda = -\rho_{\text{solvant}} * h$

- Une expérience permettant de mesurer la concentration du soluté dans la phase liquide à un instant t : $C_l(t)$.

En ayant C_0 et s on peut déterminer $C_{l\infty}$ et utiliser les relations IV.g et IV.h du 2^{ème} modèle pour calculer K puis D :

$$K = \frac{(s - 1) \ln \left[1 - \frac{C_l(t)}{s C_0} \right]}{t}$$

V.2.2 Validation du modèle

Nous avons calculé le coefficient de transfert de matière K à différentes valeurs de temps 4, 6, 30 heures et une valeur moyenne intégrant l'ensemble des points expérimentaux.

A titre d'exemple, pour 30 heures : $C_l(t) = 0,0132$ kg/kg avec $s = 0,297$ et $C_0 = 0,0492$ kg/kg on aura :

$$K = \frac{(0,297 - 1) \ln \left[1 - \frac{0,0132}{0,297 * 0,0492} \right]}{1800}$$

$$K = 9,16 \cdot 10^{-4} \text{ mn}^{-1}$$

$$K = 1,53 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

Les courbes simulées obtenues dans chaque cas sont représentées sur la figure V.5.

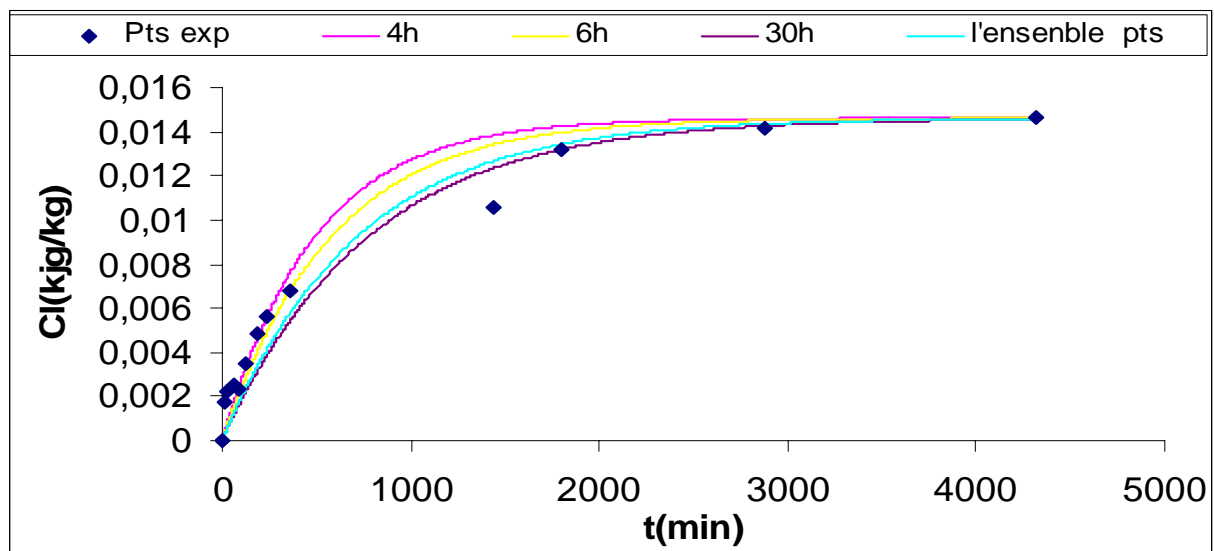


Figure V.4. Simulation de l'évolution de la concentration du soluté en fonction du temps

Nous constatons que le fait d'utiliser un point au début de l'extraction conduit à une courbe qui simule correctement la cinétique dans le domaine des temps courts, alors que de légers écarts sont observés dans le domaine des temps longs. De même, le fait d'utiliser un point expérimental situé dans le domaine des temps longs, simule correctement la cinétique

dans ce domaine de temps, alors que de légers écarts sont constatés dans le domaine des temps courts.

Toutefois, cette façon de procéder permet de simuler correctement les résultats expérimentaux dans tout le domaine des temps. Ce qui n'est pas le cas pour le 1^{er} modèle basé sur la résolution analytique des équations de transfert de matière.

En ce qui concerne notre exemple, nous avons le coefficient de diffusion à:

$$D=5,928510^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$$

On remarque dans ce cas, une légère différence entre le coefficient de diffusion estimé en tenant compte de tous les points et celui obtenu par notre méthode $\Delta D= 6,35 \cdot 10^{-12} - 5,92 \cdot 10^{-12} = 0,43 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, ce qui implique une erreur de 7%, l'écart maximale entre les points expérimentaux et la courbe simulée a été évalué à 10%.

V.4. Application du modèle à un autre système

Nous avons appliqué cette méthode aux résultats expérimentaux relatifs à l'extraction des essences des graines de coriandre par le méthanol :

- Essais réalisés avec différents hydromodules.
- Essais réalisés avec des graines de coriandre ayant différent taux d'humidité

Nous avons pris les points expérimentaux de quatre heures pour chaque essais et les équation donnant la variation de la concentration du soluté en phase liquide en fonction du temps. Les figure.V.5 et V.6 présentent les points expérimentaux et les courbes simulées.

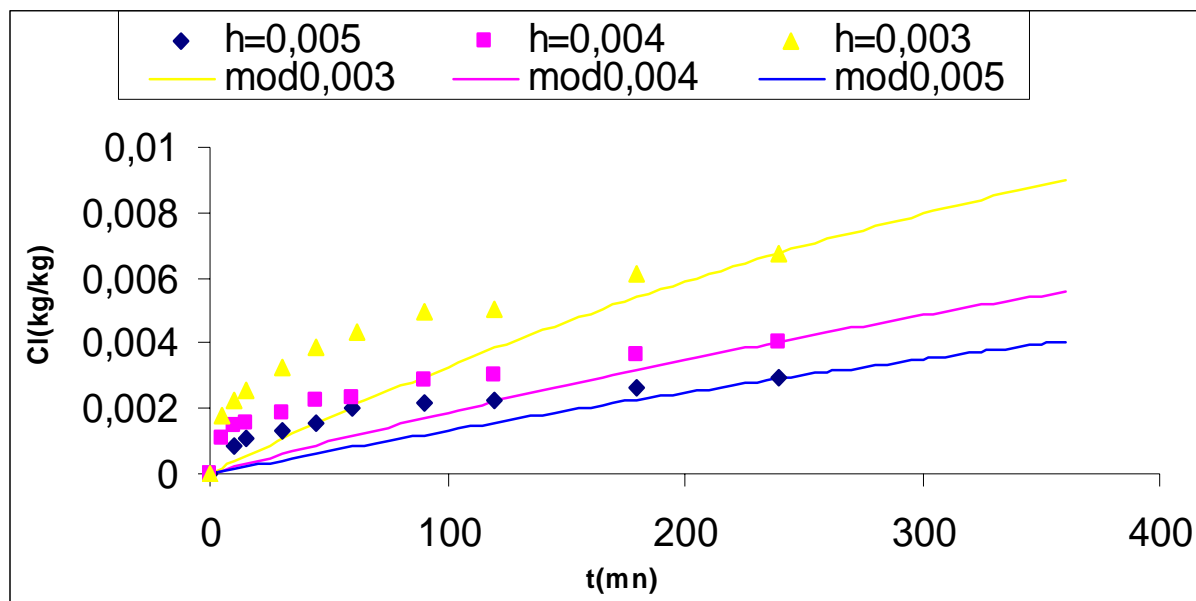


Figure.V.6. Simulation de l'évolution de la concentration du soluté en fonction du temps pour différents hydromodules

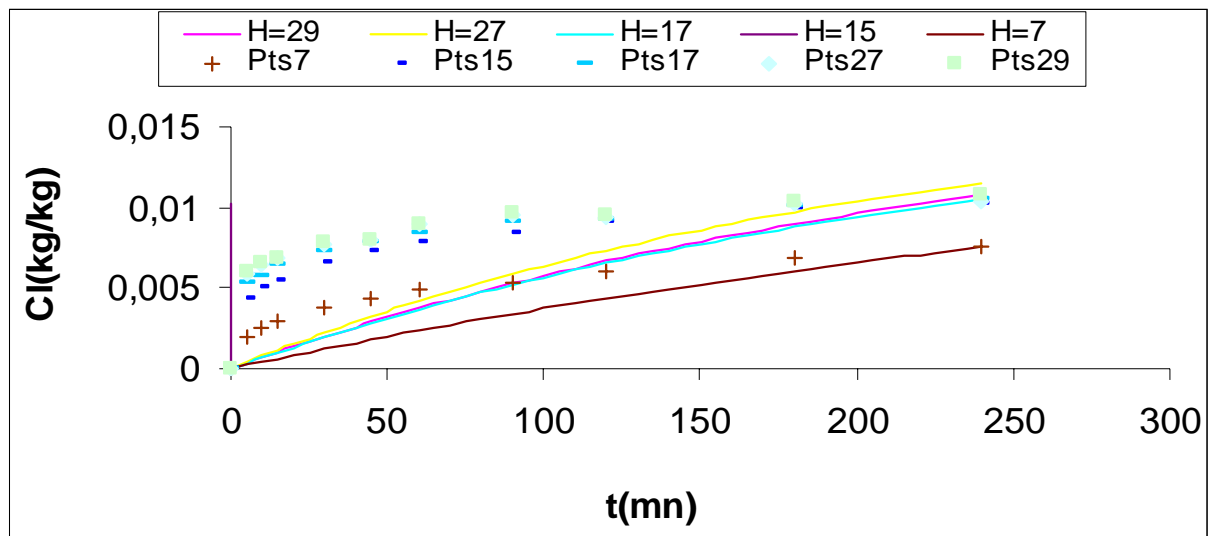


Figure.V.6. Simulation de l'évolution de la concentration du soluté en fonction du temps pour différents taux d'humidité

Nous constatons que les écarts les plus importants sont observés en début d'extraction où l'évolution ne suit pas une loi exponentielle.

Par ailleurs, nous avons calculé les coefficients de diffusion par la relation $D = \frac{KR^2}{q_i^2(1-s)}$

les tableaux.V.4 et V.5 regroupent les résultats obtenus.

Tableau.V.4.Coefficient de diffusion déterminés par le modèle propose pour différents hydromodules

Hydromodule (m ³ /kg)	0.003	0.004	0.005
Coefficient de diffusion (m ² /s)	7,71 10 ⁻¹²	4,99 10 ⁻¹²	4.13 10 ⁻¹²

Tableau.V.5.Coefficients de diffusion déterminés par le modèle proposé pour différents taux d'humidité

Taux d'humidité	7	15	17	27	29
Coefficient de diffusion (m ² /s)	9,13 10 ⁻¹²	1,42 10 ⁻¹¹	1,47 10 ⁻¹¹	1,39 10 ⁻¹¹	1,49 10 ⁻¹¹

Ces résultats montrent une diminution du coefficient de diffusion avec l'augmentation de l'hydromodule. Le coefficient de diffusion obtenu pour les graines avec un taux d'humidité

naturel de 7% est nettement inférieur à ceux obtenu avec les graines humidifiées. Le coefficient de diffusion varie très peu lorsque le taux d'humidité passe de 15 à 29%.

Notons que les valeurs des coefficients de diffusion déterminés par cette méthode sont inférieures à ceux calculés par le biais de la fonction standard. [14]

Conclusion

Le travail entrepris traite de l'étude des processus et de la modélisation du transfert de matière lors de l'extraction de l'essence des graines de coriandre par solvant.

A cet effet, nous avons, dans un premier temps, tenté de vérifier certaines des hypothèses émises pour le développement des différents modèles. Ainsi, nous avons montré, sur la base des données expérimentales, que le coefficient de partage est égal à l'unité. Quant à l'hypothèse de la constance du coefficient de diffusion durant toute la durée d'extraction, celle-ci n'a pas pu être confirmée, vu la différence entre les valeurs obtenues pour les longs et les temps courts. Concernant l'impact de la valeur de α sur le coefficient de diffusion, nous avons constaté que le fait d'attribuer à α une valeur infinie, alors que les conditions opératoires ne le permettent pas, a pour conséquence une diminution de la valeur du coefficient de diffusion.

Dans un second temps, nous avons développé une méthode relativement simple pour atteindre le coefficient de diffusion moyennant deux essais, permettant à déterminer la concentration initiale du soluté dans la phase solide et la concentration du soluté dans la phase liquide à un instant t .

Les résultats de la simulation ont montré que le modèle est d'autant plus précis que la concentration du soluté dans la phase liquide est déterminée à un instant situé à la frontière entre les domaines des temps courts et des temps longs.

Je voudrais, pour conclure, attirer l'attention sur un élément remarqué lors de nos travaux: Le manque de données expérimentales dans le domaine intermédiaire entre les temps courts et les temps longs. Ces données pourraient permettre le choix du point expérimental $C_I(t)$ à utiliser pour aboutir à la meilleure simulation, car la courbure des graphes simulés est situé dans ce domaine.

ANNEXE

Tableau A.1 Solution de $\tan q_n = \frac{3q_n}{3 + \alpha q_n^2}$

Fraction échangée	α	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6
0	∞	3.1416	6.2832	9.4248	12.5664	15.7080	18.8496
0.1	9.0	3.241	6.3353	9.4599	12.5928	15.7292	18.8671
0.2	4.0	3.3485	6.3979	9.5029	12.6254	15.7554	18.8891
0.3	2.333	3.465	6.4736	9.5567	12.6668	15.7888	18.9172
0.4	1.5	3.5909	6.5665	9.6255	12.7205	15.8326	18.9541
0.5	1.0	3.7264	6.6814	9.7156	12.7928	15.8924	19.0048
0.6	0.6667	3.8711	6.8246	9.8369	12.894	15.9779	19.0784
0.7	0.4286	1.0236	7.0019	10.0039	13.0424	16.1082	19.1932
0.8	0.25	4.1811	7.2169	10.2355	13.2689	16.3211	19.3898
0.9	0.1111	4.3395	7.4645	10.5437	13.6133	16.6831	19.7564
1	0	4.4934	7.7253	10.9041	14.0662	17.2208	20.3713

Bibliographie

[1] www.toildepices.com

[2] www.saveursdumonde.net

[3] www.google.fr

A.SKIREDJ ET H.ELATTIR

Transfert de technologie en agriculture

Institut agronomique et vétérinaire , Rabat ,N°96 Septembre 2002

[4] F .KOLAI

Modélisation du transfert de matière lors de l'extraction des essence de grain de coriandre par l'éthanol et le binaire éthanol-eau

Projet de fin d'étude , Département de Génie Chimique Ecole National Polytechnique.
Alger .2004

[5] www.euro-ingredients.com

Coriander Extract

[6] E.GILDEMEISTER,F.HOFFMAN

Die aetherischen Oele VII (1961)

[7]: E. H. BE NYOUSSEF, N. BEDDEK, R. BELLABES, J. M. BESSIERE, Evolution des effets de certains paramètres opératoires de l'entraînement à la vapeur d'eau des graines de coriandre sur le rendement en huile essentielle, Ed. Entropie, N° 229, ETRPA 36(229), 1-64, Dec 2000, pp18-23.

[8] P.MAFART ET E.BELIARD

Génie Industriel Alimentaire . Tome 1

Ed Tech et doc ;Lavoisier .paris (1992)

[9] J.LEYBORS P.FREMEAUX

Extraction solide-liquide

Techniques de l'ingénieur J2780, Paris 1990, pp7-8, 4-40

[10] M.GUERENT , M.HAMON.

Abrégé de chimie analytique. chimie des solution

Tome 1, 2nd Ed, Masson .Paris 1981, pp1-12

[11] R.GELU

Les technique d'extraction par fluide supercritiques applique a l'industrie aromatique .

Revue de l'industrie agro-alimentaire .CAL/PFIZER, Vol 106, N°9, Paris sept 1989, pp766-767

[12] S,BOUSTILA

Optimisation du procédé de récupération des acides gras du liège de Quercus Suber L. par dépolymérisation alcaline de la subirine

These de de Magister, Département de Génie Chimique ENP ,Alger 1995

[13] MURRY R.S.SPIEGL

Théorie et application de la statistique (série schum)

Ed (française) par Alain et jean François, 1982

[14] F.AMOKRANE

Modélisation du transfert de matière lors de l'extraction de l'essence des grains de coriandre par le méthanol

Thèse de magister , Département de Génie Chimique ENP Alger 2002

[15] N.CHIBANE

Modélisation du transfert de matière lors de l'extraction des essences des graines de coriandre par l'éthanol.

Projet de fin d'étude .ENP d'Alger. département de Génie chimique ,2005

[16] N.BEDDEK

Extraction de l'huile essentielle de coriandre par différents procédés

Thèse de magister .ENP .Alger, 1995

[17] M.ZAIDI

Détermination du coefficient de diffusion lors de l'extraction des de coriandre par le méthanol

Projet de fin d'étude .ENP d'Alger. département de Génie chimique ,2001

[18] J. CRANK,

The mathematical of diffusion.

Ed. CLARENDON PRESS, Oxford, 1975, pp1-8, pp84-98, pp219-230.

[19] D.DEFIVES

Efficacité des opération de génie chimique.

Willey, New York ,1960.

[20] W.K.LEWIS & WITHMAN W.G.

Industrial engineering chimical.16.1924p.1215.

[21] www.ni.com

[22] E.H. BENYOUSSEF et col.

Modélisatrice du transfert de matière lors de l'extraction de l'huile essentielle des fruits de coriandre.

Chemical Engineering Journal 3820 (2001).

[23] A.LALOU et col.

Extraction d'hémicelluloses des coques de tournesol en colonne pulsée.

1^{ère} conférence maghrébine de génie des procédés.