



**HAL**  
open science

# Contribution théorique et modélisation des phénomènes instantanés dans les opérations d'autovaporisation et de déshydratation

Mazen Al Haddad

► **To cite this version:**

Mazen Al Haddad. Contribution théorique et modélisation des phénomènes instantanés dans les opérations d'autovaporisation et de déshydratation. Génie des procédés. Université de La Rochelle, 2007. Français. NNT: . tel-00399138

**HAL Id: tel-00399138**

**<https://theses.hal.science/tel-00399138>**

Submitted on 25 Jun 2009

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ de La Rochelle  
UFR des SCIENCES

Année : 2007

Numéro attribué par la bibliothèque :

--	--	--	--	--	--	--	--

THÈSE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR

De L'UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE

Discipline: Génie des Procédés Industriels

par

---

Mazen AL HADDAD

Soutenu

---

Le 17 décembre 2007

Contribution théorique et modélisation des phénomènes  
instantanés dans les opérations d'autovaporisation et de  
déshydratation

Directeurs de thèse : Pr. V. SOBOLIK & Pr. K. ALLAF

JURY:

K. ALLAF	Professeur Université de La Rochelle	
H. PEERHOSSAINI	Professeur Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes	
I. PILATOWSKY	Professeur Université National Autonome de Mexico	Rapporteur
V. SOBOLIK	Professeur Université de La Rochelle	
E. VOROBIEV	Professeur Université de Technologie de Compiègne	Rapporteur



A mes parents...



---

## Remerciements

*Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire Maîtrise des Technologies Agro-Industrielles (LMTAI) de l'université de La Rochelle. Il a été financé par le conseil régional Poitou-Charentes.*

*Je voudrais tout d'abord remercier le Professeur Karim ALLAF pour avoir accepté de m'accueillir au sein de son laboratoire en vue d'y accomplir mes travaux de thèse.*

*Je tiens à remercier très sincèrement Messieurs les Professeurs Karim ALLAF et Vaclav SOBOLIK pour avoir accepté de diriger cette thèse. Je leur exprime ma profonde gratitude pour leurs conseils, leur soutien et leur aide scientifique et technologique qui m'ont permis de mener à bien ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers Monsieur Eugène VORBIEV, Professeur de Génie des Procédés de l'Université de Technologie de Compiègne (UTC), Monsieur Isaac PILATOWSKY, Professeur à l'Université Nationale Autonome de Mexico (CIE, Centro de Investigaciones en Energia, Morales) qui m'ont fait l'honneur d'avoir accepté d'être les rapporteurs de mon mémoire de thèse. Je tiens également à remercier Monsieur Hassan PEERHOSSAINI, Professeur à l'Ecole Polytechnique de l'Université de pour avoir accepté de faire partie du jury de ma thèse.*

*J'adresse également mes sincères remerciements à tous les doctorants, toutes les secrétaires et tous les assistants ingénieurs du LMTAI, au personnel du département Génie des Procédés au personnel de la société ABCAR-DIC Process, aux secrétaires de l'école doctorale et à tout ceux et celles qui ont participé, de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.*

---



# **Table des Matières**





# Table des Matières

<b>PARTIE I.</b>	<b>PROBLEMATIQUES DE L'AUTOVAPORISATION ET DU SECHAGE</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I.1</b>	<b>Problématiques de l'autovaporisation</b>	<b>1</b>
I.1.1	La thermodynamique	1
I.1.1.1	Bref historique	2
I.1.1.2	Quelques définitions	3
I.1.1.2.1	Système	3
I.1.1.2.2	Équilibre thermodynamique	3
I.1.1.2.3	Transformations quasi-statiques	3
I.1.1.2.4	Transformations réversibles / irréversibles	4
I.1.1.3	Principes de la thermodynamique	4
I.1.1.3.1	Premier Principe	4
I.1.1.4	Deuxième Principe	5
I.1.1.4.1	Définition de l'entropie	5
I.1.1.4.2	Enoncé du deuxième principe	5
I.1.1.4.3	Implication du deuxième principe	6
I.1.2	Autovaporisation : processus et applications	6
I.1.2.1	Systèmes d'expérimentation et opérations réalisées	6
I.1.2.1.1	Ebullition explosive (Explosive boiling)	7
I.1.2.1.1.1	Définition	7
I.1.2.1.1.2	Applications	8
I.1.2.1.1.3	Modèle mathématique	9
I.1.2.1.1.3.1	Hypothèses	10
I.1.2.1.1.3.2	Équations du modèle	11
I.1.2.1.2	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE)	11
I.1.2.1.3	Loss Of Coolant Accident (LOCA)	13
I.1.2.1.4	Refroidissement par Flash détente (Vendange)	14
I.1.2.1.5	Flash evaporation from water pool	15
I.1.2.1.6	Water Flash Evaporation Cooling (WFEC)	17
I.1.2.1.7	Impulse drying	19
I.1.2.1.8	Cryogen Spray Cooling (CSC)	21

I.1.2.1.8.1	Effets de la durée de pulvérisation et de la distance	22
I.1.2.2	Les procédés développés au LMTAI	26
I.1.2.2.1	Présentation de la DIC	27
I.1.2.2.2	Présentation de la Déshydratation par Détentes Successives (DDS)	27
I.1.2.2.3	Présentation de l'atomisation sous vide	28
I.1.2.2.4	Principaux résultats	29
I.1.3	conclusion	29
<b>Chapitre I.2</b>	<b>Problématiques du séchage : Cinétique et qualité</b>	<b>31</b>
I.2.1	Le séchage	31
I.2.1.1	Intérêt du Séchage	31
I.2.1.2	Teneur en eau d'équilibre	33
I.2.1.3	Facteurs de contrôle du séchage	34
I.2.1.4	Retrait et Rétrécissement	36
I.2.1.4.1	Analyse du phénomène	36
I.2.1.4.1.1	Impact qualitative et cinétique	36
I.2.1.5	Cinétiques de séchage	37
I.2.1.6	Périodes de séchage	37
I.2.1.7	Propriétés thermiques fruits et légumes en morceaux	41
I.2.1.7.1	Transferts internes	44
I.2.1.7.1.1	Transfert de matière	45
I.2.1.7.1.2	Transfert de chaleur	46
I.2.1.7.2	Transferts externes	46
I.2.1.7.2.1	Phénomènes limitant	47
I.2.1.8	Les Microondes	48
I.2.1.8.1	Traitement par microondes	50
I.2.1.8.2	État actuel du traitement par microondes	51
I.2.1.8.3	Interaction entre les microondes et la matière	51
I.2.1.8.4	Eau et diélectriques aqueux	52
I.2.1.8.5	Séchage par microondes	53
I.2.1.9	Séchage par DDS	54
I.2.1.9.1	Synthèse sur l'influence des paramètres de la DDS	55
I.2.1.9.1.1	Effet des paramètres de la DDS sur le séchage	56
I.2.1.9.1.1.1	Effet du niveau de pression haute (Ph) et du niveau de pression basse (Pb)	56
I.2.1.9.1.1.2	Effet de la durée des cycles	56

I.2.1.9.1.2	Cinétique de séchage et qualité des produits	57
-------------	--	----

## **PARTIE II. ETUDES FONDAMENTALES DE L'AUTOVAPORISATION ET DU SECHAGE** **58**

### **Chapitre II.1 Thermodynamique de l'instantanéité : Approche fondamentale** **55**

II.1.1	Analyse théorique des phénomènes d'instantanéité	55
II.1.1.1	Les transformations simples :	55
II.1.1.2	Les transformations complexes :	56
II.1.1.2.1	Hiérarchie des paramètres thermodynamiques	57
II.1.1.2.2	Entropie totale nulle	57
II.1.2	Etude de cas	57
II.1.2.1	Gouttelette d'eau	57
II.1.2.1.1	Détente Instantanée	58
II.1.2.2	Remise à la température d'équilibre	65
II.1.2.3	Validation du modèle	69
II.1.2.3.1	Transformation quasi-statique (A→C)	69
II.1.2.3.2	Transformation instantanée (A→B puis B→C)	70
II.1.2.4	Gouttelette de tétrafluoroéthane (R134a)	71
II.1.2.4.1	Explication par la théorie de l'instantanéité	71
II.1.2.5	BLEVE et LOCA	72
II.1.2.5.1	Explication par la théorie de l'instantanéité	73
II.1.3	Les fondements de la thermodynamique de l'instantanéité	73

### **Chapitre II.2 Le séchage : Approche fondamentale** **75**

II.2.1	Approche fondamentale	75
II.2.1.1	Les phénomènes de transfert	76
II.2.1.1.1	Transfert interne de matière	76
II.2.1.1.2	Transfert interne de chaleur	79
II.2.1.2	Première intensification : L'Expansion	80
II.2.1.2.1.1	Expansion par détente instantanée contrôlée DIC	81
II.2.2	Caractérisation physique et thermique	81
II.2.3	Le paradoxe	82
II.2.4	Deuxième Intensification : Remédier à l'étape paradoxale	83
II.2.4.1	Séchage par DDS	84
II.2.4.1.1	Approche fondamentale et modélisation de la DDS	84

II.2.4.1.1.1	Analyse de l'opération	84
II.2.4.1.1.2	Approche de modélisation	85
II.2.4.1.1.3	Établissement du modèle	86
II.2.5	Le séchage par micro-ondes	87
<b>PARTIE III. ANALYSE EXPERIMENTALE</b>		<b>89</b>
<b>Chapitre III.1 Analyse expérimentale de l'autovaporisation</b>		<b>91</b>
III.1.1	Matériel et Méthodes : Instantanéité	91
III.1.1.1	Le dispositif expérimental :	91
III.1.1.1.1	Description du dispositif	91
III.1.1.1.1.1	Système de compression adiabatique	92
III.1.1.1.1.2	Enceinte de traitement	93
III.1.1.1.1.3	Système de vide	94
III.1.1.1.1.4	Système d'acquisition	94
III.1.1.1.2	Protocole d'expérimentation	95
III.1.2	Expérimentation	95
III.1.2.1	Résultats	95
III.1.2.2	Interprétation	99
III.1.2.3	L'expansion par détente instantanée	100
III.1.2.3.1	Explication par la théorie de l'instantanéité	101
<b>Chapitre III.2 Analyse Expérimentale du Séchage : Double intensification</b>		<b>103</b>
III.2.1	Matériel et méthodes : Séchage	103
III.2.1.1	Le réacteur DIC	103
III.2.1.1.1	Description du réacteur	104
III.2.1.1.1.1	La chambre de traitement	104
III.2.1.1.1.2	Le système à vide	105
III.2.1.1.1.3	Le système de connexion	105
III.2.1.2	Le réacteur DDS	106
III.2.1.2.1	Présentation de la Déshydratation par Détentes Successives (DDS)	106
III.2.1.2.2	Description du réacteur	108
III.2.1.2.2.1	La chambre de traitement	108
III.2.1.2.2.2	Le système de connexion	109
III.2.1.2.2.3	Le réservoir à vide	109
III.2.1.2.2.4	Système d'acquisition	109

III.2.1.3	L'atomisation sous vide (VCS)	110
III.2.1.3.1	Description Dispositif	110
III.2.1.3.2	Programme d'acquisition des données LABVIEW.	112
III.2.1.4	Le séchage par micro-ondes	113
III.2.1.4.1	Protocole d'analyse	113
III.2.1.5	Étuve :	114
III.2.1.5.1	Séchage initial	114
III.2.1.5.2	Séchage final	114
III.2.1.6	Méthodes de caractérisation	114
III.2.1.6.1	Mesure de la teneur en eau des produits :	115
III.2.1.6.1.1	Méthode AFNOR (Étuve Air Chaud)	115
III.2.1.6.1.2	Analyseur électronique d'humidité (Sartorius MA 30)	115
III.2.1.6.2	Taux d'expansion	115
III.2.1.6.2.1	La masse volumique spécifique	115
III.2.1.6.2.2	Le taux d'expansion relatif	116
III.2.1.6.2.3	Le taux d'expansion absolu	116
III.2.1.6.3	Cinétique de séchage	116
III.2.1.7	Méthode d'analyse expérimentale	116
III.2.1.7.1	Composition d'un plan d'expériences	117
III.2.1.7.1.1	Les points en étoiles	117
III.2.1.7.1.2	Les points centraux	118
III.2.1.7.1.3	Analyse par Statgraphics	118
III.2.1.7.1.4	Analyse de variance : Tableau ANOVA	119
III.2.1.7.1.5	Test des différents facteurs	119
III.2.2	Expérimentation	119
III.2.2.1	Première intensification du séchage	120
III.2.2.1.1	Effets mécanique et thermomécanique:	121
III.2.2.1.2	Résultats du traitement thermomécanique (DIC-VAP)	122
III.2.2.1.3	Résultats du traitement mécanique (DIC- AIR)	124
III.2.2.1.3.1	Conclusion	126
III.2.2.2	Effet de la non-instantanéité	126
III.2.2.2.1	Explication par la théorie de l'instantanéité	128
III.2.2.3	Cinétiques de séchage	130
III.2.2.3.1	Résultats	131
III.2.2.3.1.1	Résultats issus du modèle	133
III.2.3	Conclusion	135

III.2.3.1	Deuxième intensification du séchage	136
III.2.3.1.1	La déshydratation par détentes successives (DDS)	136
III.2.3.1.1.1	Résultats	138
III.2.3.1.1.1.1	Effet de l'instantanéité	140
III.2.3.1.1.1.2	Comparaison des cinétiques de séchage	141
III.2.3.1.1.1.3	Validité du modèle	142
III.2.3.1.1.1.4	Conclusion	142
III.2.3.2	Le séchage par microondes	143
III.2.3.2.1	Cinétique	143
III.2.3.2.2	Traitement des résultats	143
III.2.3.2.3	Résultats	144
III.2.3.2.4	Conclusion	146
<b>PARTIE IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b>		<b>148</b>
<b>Chapitre IV.1</b>	<b>Conclusion</b>	<b>149</b>
IV.1.1	Autovaporisation	149
IV.1.2	Déshydratation	150
<b>Chapitre IV.2</b>	<b>Perspectives</b>	<b>153</b>
IV.2.1	Autovaporisation	153
IV.2.1.1	Modélisation de l'expansion	153
IV.2.1.2	Quantification et mélanges complexes	158
IV.2.1.3	Nouvel axe de recherche	158
<b>PARTIE V. TRAVAUX CITE</b>		<b>159</b>
<b>LISTE DE FIGURES</b>		<b>177</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>		<b>183</b>
<b>INDEX</b>		<b>187</b>
<b>RESUME:</b>		<b>221</b>





## **Nomenclature**



## Nomenclature

### Alphabet Latin

A	la surface d'échange	$m^2$
c	la capacité calorifique	$J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
C <sub>a</sub>	la concentration du corps a	$mole. m^{-3}$
c <sub>p</sub>	la capacité calorifique du produit	$J. kg^{-1}.K^{-1}$
C <sub>v</sub>	la capacité calorifique de la gouttelette	$J. kg^{-1}.K^{-1}$
D	la diffusivité de la vapeur à l'intérieur du produit	$m^2.s^{-1}$
D <sub>a,b</sub>	Coefficient de diffusion ou diffusivité de a dans b	$m^2.s^{-1}$
F	Facteur de forme	$m/J$
h	le coefficient de transfert de chaleur par convection	$W .m^{-2}.K^{-1}$
H	la teneur en eau	$kg_{eau}/ kg_{Matière sèche}$
H <sub>eq</sub>	la teneur en eau à l'équilibre	$kg_{eau}/ kg_{Matière sèche}$
H <sub>init</sub>	la teneur en eau initiale du produit	$kg_{eau}/ kg_{Matière sèche}$
J <sub>a</sub>	le flux de diffusion du corps a	$mol. m^{-1}. s^{-1}$
k <sub>m</sub>	le coefficient de transfert de masse	$kg. m^{-2}.s^{-1}.Pa^{-1}$
l	la demi-épaisseur de la surface plane	$m$
L	la chaleur latente de condensation	$J. kg^{-1}$
L <sub>v</sub>	la chaleur latente de vaporisation	$J. kg^{-1}$

## *Nomenclature*

---

$m$	la masse	kg
$m_g$	la masse d'eau éliminée par autovaporisation	kg
$m_l$	la masse de la gouttelette d'eau après autovaporisation	kg
$M_w$	Masse molaire de l'eau	kg.kmol <sup>-1</sup>
$n$	le nombre de moles d'eau évaporée	moles
$p$	la pression partielle de vapeur d'eau de l'air	Pa
$p_a$	la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air à la surface du produit	Pa
$p_s$	la pression partielle de vapeur d'eau en surface du produit	Pa
$p_w$	la pression de vapeur saturante de l'eau à $T_w$	Pa
$Q$	la quantité de chaleur fournie en volume	W.m <sup>-3</sup>
$R$	la constante des gaz parfaits	8314 J/kmole °K
$R_c$	le rayon (Cylindre, Sphère)	m
$S$	Entropie	
$t$	le temps	s
$T$	la température	K
$T_a$	la température de l'air en contact avec la surface du produit	K
$T_A$	la température de la surface du produit	K
$T_e$	la température d'équilibre du produit	K

## *Nomenclature*

---

$T_i$	la température initiale du produit	K
$T_s$	la température minimale du produit	K
$T_w$	la température humide de l'air	K
$p_a$	la pression partielle de vapeur d'eau du milieu environnant	Pa
$p_s$	la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit	Pa
$p_v$	la pression partielle de vapeur d'eau au sein du produit	Pa
$V$	le volume du produit	
$v_a$	Vitesse moyenne absolue du premier corps	$m.s^{-1}$
$v_b$	Vitesse moyenne absolue du deuxième corps	$m.s^{-1}$
$V_{eau}$	le volume de l'eau dans le produit	$m^3$
$V_m$	le volume de la matière proprement dite	$m^3$
$w$	Teneur en eau	%

## **Alphabet Latin**

$\beta_n$	les racines de la fonction de Bessel	
$\varepsilon_{a,r}$	les taux d'expansion relatif (r) et absolu (a)	
$\lambda$	la conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\lambda_e$	la conductivité thermique du produit expansé	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\lambda_{eau}$	la conductivité thermique de l'eau	$W.m^{-1}.K^{-1}$

## *Nomenclature*

---

$\lambda_m$	la conductivité thermique de la matière proprement dite	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\lambda_p$	la conductivité thermique globale du produit	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\lambda_p$	la conductivité thermique du produit non expansé	$W.m^{-1}.K^{-1}$
$\rho$	la masse volumique du matériau	$kg.m^{-3}$
$\rho_e$	la masse volumique du produit expansé	$kg.m^{-3}$
$\rho_p$	la masse volumique spécifique du produit	$kg.m^{-3}$
$\rho_a$	Masse par unité de volume du corps a	$kg.m^{-3}$
$\rho_b$	Masse par unité de volume du corps b	$kg.m^{-3}$
$\omega$	La vitesse de séchage par DDS	$kg.s^{-1}$
$\Omega$	Efficacité de séchage par cycle de DDS	$kg.cycle^{-1}$
$v$	Ratio de détente DDS	
$\xi$	Ratio de diffusion	

# **Glossaire**

## Glossaire :

ATM : Pression Atmosphérique

DDS : Déshydratation pa détente successive

Diam : Diamètre

DIC :Détente Instantanée Contrôlée

MP : Matière Première

NI : Non Instantané

VAC : Vide



# **Introduction**



La détente instantanée contrôlée DIC est une technologie qui a été définie, étudiée puis développée en tant que l'une des principales thématiques du laboratoire LMTAI à partir de 1988. Elle a démarré à partir des études fondamentales et de modélisation de l'expansion par alvéolation (cuisson- extrusion, puffing...). Les différents procédés issus de cette technologie ont en commun un traitement thermique sous une pression relativement élevée suivi d'une détente vers le vide. Le traitement thermique est généralement de type HTST (haute température- courte durée). L'ensemble de ces procédés se distingue par la nature « abrupte » (dite instantanée) de la détente vers le vide, assurant ainsi l'autovaporisation d'une certaine quantité d'eau contenue dans la matière humide. Le terme « autovaporisation » a pour but de traduire le fait que la chaleur nécessaire à ce processus est presque exclusivement « fournie » par cette matière impliquant nécessairement son refroidissement. La nature « abrupte » du processus induit, souvent, une certaine expansion (alvéolation) des produits biologiques ; les premières applications de la DIC ont ainsi permis de remédier au phénomène de « retrait » qui caractérise la déshydratation par air chaud et d'améliorer les cinétiques des phases ultérieures de séchage, menant par la suite, à l'obtention de produits finis de très hautes qualités texturale, organoleptique et hygiénique.

En tant que processus fondamental, l'autovaporisation instantanée est corrélée à une variation abrupte des conditions thermodynamiques du milieu environnant en deçà de la saturation du liquide. Pendant l'autovaporisation, aucun transfert de chaleur entre le matériau et le milieu extérieur n'a alors lieu vu la courte durée du processus ; la quantité de chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau est récupérée uniquement au sein même de la matière qui voit sa température baisser d'une façon significative. La quantité de vapeur ainsi créée engendre des contraintes mécaniques dont l'impact dépend du comportement rhéologique au sein du produit et de son taux d'évolution hydrothermique.

Calqués sur le principe d'autovaporisation instantanée, d'autres procédés ont été développés au laboratoire. Nous en citerons la déshydratation par détentes successives (DDS) et la pulvérisation contrôlée sous vide (CVS).

Dans la déshydratation par détente successive (DDS), le séchage a principalement lieu par autovaporisation accompagnant chacune des détente. La « diffusion » de la vapeur d'eau au sein de la matière a pour élément moteur le gradient de pression totale entre l'intérieur du produit et le milieu environnant.

La pulvérisation contrôlée sous vide (CVS) est un procédé de séchage conçu pour les produits liquides pompables à forte évolution des caractéristiques hydro-thermo-rhéologiques. Le liquide préalablement chauffé puis pulvérisé sous forme de fines gouttelettes dans le vide perd par autovaporisation une partie de son eau ; la chute d'humidité et de température du produit pourrait, dans quelques cas intéressants, assurer la transition vitreuse et la préservation de la forme « rigide » du granule obtenu.

D'autres procédés industriels et phénomènes physiques font appel à ce même processus d'autovaporisation, souvent désigné sous le nom d'évaporation flash dans la littérature.

Une des applications de l'autovaporisation concerne le dessalement de l'eau de mer ; il s'agit de produire de l'eau potable en utilisant des générateurs flashs multi-étages (Miyatake, 1994) (Fath, 1997) (Miyatake, et al., 1997) (Jin, et al., 1999) (Miyatake, et al., 2001) (Kalogirou, et al., 2001) (Jernqvist, et al., 2001) (Splegler, et al., 2001) (Ikegama, et al., 2006)

Le procédé de « puffing » concerne également l'alvéolation de produits biologiques à travers une détente instantanée vers la pression atmosphérique ; ce procédé est principalement et exclusivement appliqué aux produits céréaliers.

Une autre application dite « impulse drying » est utilisée à l'échelle industrielle ; elle concerne le séchage des feuilles de papier humide en les plaçant sous une pression, allant de 2 à 6 MPa d'un rouleau presse chauffé entre 150°C et 300°C pendant une très courte durée (20-40 ms) ; la détente qui s'en suit assure l'élimination de l'eau par autovaporisation (Woods, et al., 2000).

La haute capacité de refroidissement de l'autovaporisation permet son utilisation dans les procédés nécessitant un refroidissement rapide. La pulvérisation de liquides contre des surfaces sous basse pression permet une très grande capacité d'évacuation de chaleur par unité de masse du réfrigérant.

Ce procédé est utilisé avec de l'eau dans le refroidissement des surfaces chaudes des navettes spatiales dans l'espace ainsi qu'avec du R134a qui, par pulvérisation sur la peau permet de réduire les effets de brûlures lors du traitement laser.

D'autre part, une autovaporisation de type « rapide » intervient aussi dans de nouveaux procédés de fabrication de vin. La vendange chauffée à des températures avoisinant 90°C est refroidie par flash-détente à des températures favorables à la fermentation du vin (aux alentours de 30°C).

D'autres études concernant la sécurité des procédés ont montré que l'autovaporisation apparaît lors de la rupture d'un réservoir contenant un gaz liquéfié, des produits inflammables (BLEVE) ou même lors de la rupture par explosion du circuit de refroidissement contenant un réfrigérant sous une haute pression (Loss Of Coolant Accident, LOCA).

Cette liste non-exhaustive des diverses interventions de l'autovaporisation montre l'intérêt de ce phénomène tant comme procédés industriels que comme phénomène fondamental physique. D'une manière générale, l'instantanéité semble capable de générer par autovaporisation une quantité de vapeur largement supérieure à celle obtenue par transformation similaire de type quasi-statique et la température des surfaces atteint ainsi des valeurs en deçà de la température de saturation à la pression finale d'équilibre..

Malgré les nombreuses applications et les expérimentations réalisées, aucune étude thermodynamique classique n'a pu expliquer les phénomènes observés ; seule l'analyse théorique spécifique aux phénomènes d'instantanéité proposée par ALLAF en 2002 (Allaf, 2002), semble pouvoir être à la base de l'explication et l'étude de ce type d'autovaporisation.

L'objectif de ce travail consiste à utiliser cette analyse théorique spécifique aux phénomènes d'instantanéité pour expliquer des opérations étudiées au sein de notre laboratoire et prouver ainsi sa pertinence thermodynamique. Les procédés de texturation par détente instantanée contrôlée (DIC) et de déshydratation par détentes successives (DDS) seront ainsi mieux analysés au plan fondamental ; le modèle pour

prédire l'expansion par DIC des produits biologiques a pu alors prendre en considération ces différents aspects théoriques.

Ces deux opérations de DIC et de DDS ont, par la suite été abordées et leur impact quantifié et comparé à celui des microondes en tant que moyens d'intensification des phénomènes de séchage des fruits et légumes en morceaux. Cette partie du travail a dû porter sur l'ensemble des phénomènes de transfert lors du séchage.

Le mémoire est ici présenté en quatre parties :

1. La première partie est consacrée à l'analyse des problématiques de l'autovaporisation et du séchage. Le premier (Chapitre I.1) présente les opérations d'autovaporisation instantanée, leurs applications industrielles, les études qui y ont été menées et les principaux résultats de type phénoménologique et expérimental ainsi que les problématiques rencontrées. Dans le second chapitre (Chapitre I.2), on présente l'analyse théorique des processus de séchage des produits biologiques par air chaud, ainsi que les problématiques rencontrées.
2. Dans cette deuxième partie consacrée à l'étude fondamentale de l'autovaporisation et du séchage, nous présentons au (Chapitre II.1) la base fondamentale que nous avons adoptée dans l'étude de l'instantanéité et ses implications en termes de calculs et d'approche asymptotiques. Nous avons également analysé (Chapitre II.2) les divers processus couplés de transfert intervenant dans la déshydratation des produits alimentaires ainsi que divers procédés de séchage en vue d'aboutir à une intensification pertinente des opérations considérées.
3. La troisième partie concerne l'analyse expérimentale de l'autovaporisation et du séchage. Le (Chapitre III.1) présente le dispositif de laboratoire mis en place pour l'étude de l'instantanéité ainsi que l'ensemble des résultats de l'étude expérimentale. Le (Chapitre III.2). décrit, quant à lui, l'ensemble du matériel de

séchage et les méthodes de caractérisation des échantillons déshydratés de fruits et légumes en morceaux ainsi que l'ensemble des résultats obtenus.

4. La quatrième partie a été consacrée aux conclusions de cette étude et aux perspectives ainsi ouvertes.





**PARTIE I.**  
**PROBLEMATIQUES DE L'AUTOVAPORISATION**  
**ET DU SECHAGE**



## **Chapitre I.1**

### **PROBLEMATIQUES DE L'AUTOVAPORISATION**

La physique et la chimie sont par nature des sciences expérimentales. C'est le plus souvent par la réalisation d'expériences et à partir de leur analyse que ces sciences expérimentales progressent, même si l'élaboration des théories et des modèles reste une étape importante.

Dans cette partie, nous allons faire un petit rappel de la thermodynamique classique, suivi d'une synthèse de l'ensemble des études bibliographiques concernant l'autovaporisation et l'ensemble de ses applications.

#### **I.1.1 LA THERMODYNAMIQUE**

La thermodynamique est la branche de la physique qui étudie les systèmes caractérisés par un nombre très important de particules traitant ainsi des échanges de diverses formes d'énergie, des changements d'états et des propriétés de la matière, des transformations de types physique, chimique, nucléaire...(combustion, changement de phase,...)... La thermodynamique intervient dans les phénomènes de transfert (chaleur, matière, quantité de mouvement...) généralement à travers les états d'équilibre incluant les propriétés macroscopiques de la matière et les conditions imposées par le milieu externe.

Les lois fondamentales (ou principes) de la thermodynamique expriment les restrictions universelles qu'impose la nature aux transformations. Ces principes sont issus de l'expérience et ne découlent pas d'un principe plus puissant, bien qu'à travers la physique statistique, il ait été possible de confirmer une théorie fondamentalement phénoménologique. En pratique, les théories et les principes permettent d'approuver et confirmer les résultats expérimentaux.

### I.1.1.1 Bref historique

La thermodynamique doit son développement à l'essor des machines à vapeur à partir de la deuxième moitié du XVIII<sup>ème</sup> siècle. Au XIX<sup>ème</sup> siècle la thermodynamique s'est bien développée suite aux nombreuses expériences réalisées afin d'améliorer le rendement de ses machines à vapeur (Winterbone, 1997) (Amram, 2002) (Clérac, et al., 2003). En 1831, suite à une série d'expérimentations, Carnot proposa une certaine conservation de l'énergie : un moteur thermique ne peut fournir du travail que s'il emprunte de la chaleur à la source chaude et en restitue à la source froide. En 1860, James Prescott Joule énonça le principe fondateur de la thermodynamique, un postulat accepté par tous, « L'énergie se conserve, ... et un travail se transforme intégralement en chaleur » c'est le premier principe de la thermodynamique. L'énergie devient alors la grandeur importante de la thermodynamique et en particulier l'énergie propre au système : l'énergie interne U.

En 1865, Rudolph Clausius énonça le second principe de la thermodynamique qui, à travers la température thermodynamique T, permet de définir une grandeur bien difficile à comprendre, l'entropie (S).

En 1875, les travaux de Ludwig Boltzmann démontrent que la thermodynamique qui traite avant tout de phénomènes macroscopiques, peut être comprise à partir des analyses statistiques à l'échelle microscopique. Il introduit la célèbre relation liant l'entropie à la probabilité d'un niveau macroscopique d'un système :

$$\text{Équation I-1 } S = k_B \ln(\Omega)$$

Où S est l'entropie

$k_B$  est la constante de Boltzmann

$\Omega$  est le nombre de complexions du système

La physique statistique a permis de donner un sens physique aux différentes grandeurs macroscopiques comme l'entropie ou la température, à partir d'une analyse à l'échelle atomique (ou microscopique). En 1880: Josiah Williard Gibbs généralise le raisonnement de Boltzmann et définit les fonctions d'état énergie libre (F), enthalpie

libre (G)... d'un état d'équilibre ; les notions de chaleur et de travail deviennent alors secondaires. Max Planck (1900) et Albert Einstein (1905) renforce cette approche microscopique en définissant les bases de la mécanique quantique.

Depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle, l'objet premier de la thermodynamique est devenu l'étude des transformations traduisant souvent l'évolution vers l'état d'équilibre d'un système dans son interaction avec le milieu extérieur.

### **I.1.1.2 Quelques définitions**

#### **I.1.1.2.1 Système**

Un système thermodynamique est un ensemble matériel macroscopique délimité par une enveloppe réelle ou imaginaire du milieu extérieur. Il est caractérisé par des coordonnées brutes, phénoménologique directement mesurables comme la pression et la température.

Nous pouvons distinguer les systèmes isolés qui ne peuvent échanger ni énergie ni matière, les systèmes fermés qui échangent de l'énergie mais sans matière et les systèmes ouverts qui échangent à la fois énergie et matière avec l'extérieur. (Prigogine, 1996)

#### **I.1.1.2.2 Équilibre thermodynamique**

Un système est dit en équilibre thermodynamique lorsque chacun des critères (de type intensif) se trouve en équilibre au sein du système et en corrélation avec le milieu extérieur. L'équilibre thermique fait ainsi référence à une égalité de températures, l'équilibre mécanique à une égalité de pression et l'équilibre de phase à une égalité de potentiel chimique. Ainsi à l'équilibre thermodynamique, la température et la pression sont constants partout dans le système dans son interaction avec le milieu extérieur.

#### **I.1.1.2.3 Transformations quasi-statiques**

En thermodynamique, les transformations désignent l'évolution d'un système vers son état d'équilibre. Une transformation est dite quasi-statique si elle est suffisamment lente

pour que les critères thermodynamiques du système soient capables d'être définis en tout point (à tout moment) intermédiaires, indépendamment du milieu extérieur.

Lors d'une transformation non quasi-statique, le système évolue sans qu'il soit possible de bien définir les « états » intermédiaires ni leurs variables macroscopiques.

#### **I.1.1.2.4 Transformations réversibles / irréversibles**

Pour qu'une transformation soit réversible, il faut qu'elle soit quasi-statique aux deux plans du système et du milieu extérieur avec les états intermédiaires en équilibre. Selon I. Prigogine, , quand les équations qui décrivent un processus sont invariantes quant au signe algébrique de la variable temps, le processus est dit réversible, dans le cas contraire il est dit irréversible (Prigogine, 1996). Par exemple, l'équation de propagation des ondes dans un milieu non absorbant est invariante par substitution de  $-t$  à  $t$  et la propagation décrite est par conséquent un processus réversible :

$$\text{Équation I-2 } \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

Autrement dit, lors d'une transformation réversible, les variables d'état du système et ceux du milieu extérieur sont définis et pratiquement à valeur égale, en tout état intermédiaire ; le système en équilibre avec le milieu extérieur, passe d'un état à l'autre par une succession de transformations infinitésimales. Il suffit d'un très petit changement des paramètres extérieurs pour que le sens de la transformation s'inverse.

Lors d'une transformation irréversible, le système n'évolue que dans un seul sens, et pendant cette transformation le système se trouve hors équilibre et les variables macroscopiques mal définies. Les transformations qui ont lieu spontanément sont irréversibles.

### **I.1.1.3 Principes de la thermodynamique**

#### **I.1.1.3.1 Premier Principe**

Le premier principe ou le principe de conservation de l'énergie, dans sa forme générale postule l'existence d'une fonction d'état, appelée énergie du système, telle que sa variation par unité de temps soit égale à un certain flux provenant de l'extérieur, ou plus

précisément égale à une intégrale de surface étendue aux frontières du système. L'expression sous l'intégrale étant le produit scalaire du vecteur unitaire normal à la surface par le flux d'énergie (Prigogine, 1996).

### **I.1.1.4 Deuxième Principe**

#### **I.1.1.4.1 Définition de l'entropie**

Le deuxième principe de la thermodynamique implique la présence d'une fonction d'état extensive, appelée entropie (S), définie, dans une transformation quasi-statique d'un système, par :

$$\text{Équation I-3: } dS = \frac{\delta Q}{T}$$

Où Q est la quantité de chaleur échangée

T est la température en K

La variation d'entropie d'un système entre deux états thermodynamiques A et B peut être tout autant positive que négative. Pour la calculer, il suffit de « choisir » une transformation quasi-statique quelconque allant de A à B et d'y intégrer le rapport de la quantité de chaleur absorbée à la température.

L'entropie d'un ensemble de systèmes ou d'un système formé de plusieurs éléments est, du fait de sa nature extensive, égale à la somme des entropies de chaque élément.

#### **I.1.1.4.2 Énoncé du deuxième principe**

Le deuxième principe de la thermodynamique, appelé principe d'évolution, postule qu'une transformation thermodynamique n'est possible que si elle est capable d'engendrer une augmentation de l'entropie totale de l'univers, soit en d'autres termes, du système et du milieu extérieur :

$$\text{Équation I-4 } dS_{\text{univers}} = (dS_{\text{système}} + dS_{\text{milieu extérieur}}) \geq 0$$

#### **I.1.1.4.3 Implication du deuxième principe**

Dans le cas d'un transfert de chaleur au sein même du système, on peut diviser la variation d'entropie du système sous deux parties :  $d_e S$  traduisant la variation d'entropie, due aux échanges avec l'extérieur, et  $d_i S$  la contribution due aux modifications intérieures du système, nous avons :

$$\text{Équation I-5 } dS = d_e S + d_i S$$

Il est important de noter que l'accroissement d'entropie  $d_i S$  n'est jamais négatif, alors que la variation d'entropie du système due aux échanges avec le milieu extérieur, peut être positif ou négatif.

Dans le cas d'un système isolé, la réalisation d'une transformation réelle (nécessairement irréversible) est traduite d'une augmentation du débit d'entropie qui tend généralement vers un maximum.

### **I.1.2 AUTOVAPORISATION : PROCESSUS ET APPLICATIONS**

L'autovaporisation est le procédé par lequel de la vapeur est libérée, à partir d'un matériau humide, par variation des conditions thermodynamiques du milieu environnant en deçà de la pression de saturation du liquide ; la durée de l'opération doit être assez faible pour permettre de négliger tout échange de chaleur avec le milieu extérieur. Le corps humide se trouvant ainsi dans un état instable en termes d'équilibre de phase dès la chute de pression, fournit la majeure part de l'énergie - chaleur nécessaire à l'évaporation en question.

Dans le cas d'une autovaporisation instantanée, la variation des conditions thermodynamiques est tellement abrupte que l'on peut considérer comme nuls les phénomènes d'échange et de transfert thermique (contact, convection, rayonnement,...) entre le système et le milieu extérieur ; la chaleur d'évaporation du liquide est exclusivement fournie par la matière et le phénomène est tout naturellement accompagné d'une baisse immédiate de la température et un refroidissement instantané du produit résiduel.

#### **I.1.2.1 Systèmes d'expérimentation et opérations réalisées**

Nous avons procédé à une analyse bibliographique dans le but de répertorier aussi exhaustivement que possible les opérations déjà utilisées à l'échelle industrielle, et qui font appel à l'autovaporisation. Plusieurs systèmes et opérations ont pu ainsi être listés ;



ils font tous appel à un changement de phase ultra rapide de liquide en vapeur. Bien qu'ils aient été analysés et étudiés par de nombreux auteurs, ils n'ont généralement été analysés qu'à travers une approche expérimentale quelquefois particulièrement bien détaillée. Nous en exposerons ci-après quelques cas spécifiques.

### **I.1.2.1.1 Ebullition explosive (Explosive boiling)**

#### ***I.1.2.1.1.1 Définition***

L'ébullition explosive est un processus de changement de phase ultra rapide (liquide en vapeur) qui se produit lorsqu'un liquide se trouve hautement surchauffé. Le chauffage du liquide au-delà de son point d'ébullition en l'absence de sites de nucléation externes, peut intervenir avec des gouttelettes liquides se trouvant soudainement hautement chauffées (Birk, et al., 1996) (Avksentyuk, et al., 1999) (Fabiano, et al., 2002) (Park, et al., 2005) (Li, et al., 2005) (Andreev, et al., 2006):

- *par immersion dans un milieu chaud,*
- *par chauffage laser,*
- *par passage à travers une onde de choc,*
- *lors d'une chute abrupte de pression (pulvérisation dans le vide, projection du liquide dans l'espace interplanétaire...),*
- *etc.*

Ces processus sont si rapides (100 à 200 ms) et si violents qu'il ressemble à une explosion.

Quand des gouttes d'un liquide froid hautement volatile, entrent en contact intime et intense avec un liquide à très haute température, une évaporation explosive, ultra rapide, se produit spontanément. Cette évaporation accompagnée de la production d'une onde de choc est appelée explosion de vapeur ou détonation thermique.

Il a été noté lors d'une explosion de vapeur (Giri, et al., 2005), que c'est la fragmentation fine du liquide chaud qui détermine le transfert de chaleur entre les liquides ainsi que la vaporisation du liquide froid. En effet, il a été observé expérimentalement que la gouttelette chaude fragmente et produit des fines particules et cela suite à la formation autour de la goutte d'une bulle de vapeur qui s'agrandit avant de s'écrouler. Ce

processus de fragmentation a été étudié en utilisant une goutte chaude d'oxyde de fer dans l'eau (Nelson, et al., 1988)

#### ***1.1.2.1.1.2 Applications***

L'étude de l'explosion de vapeur obtenue lors du contact d'un gaz liquéfié avec l'eau a été également réalisée (Khabeev, et al., 1999) afin de prévoir les conséquences d'un éventuel accident lors du transport par voie maritime du gaz naturel liquéfié de ses champs d'exploitation vers les zones d'utilisation. En effet, si un bateau de GNL est impliqué dans un accident, la fuite d'une certaine quantité de gaz liquéfié et son contact intense et très rapide avec l'eau pourraient impliquer une grande explosion.

Un phénomène similaire est aussi noté dans les centrales électriques nucléaires lors du refroidissement par l'eau froide, suite à un accident, des éléments chauffés par le combustible nucléaire.

Dans l'industrie chimique, plusieurs réactions sont réalisées dans des systèmes polyphasiques mélangés. Parmi ces réactions, nous pouvons citer les suspensions, les émulsions en polymérisation et les réactions en présence de phases aqueuses et organiques. Dans ces systèmes, la perte accidentelle d'agitation peut mener à une ségrégation des phases et la poursuite de la réaction dans l'une des phases. Dans le cas d'une polymérisation, la réaction doit être réalisée dans de bonnes conditions de mélange pour obtenir les spécifications du produit désiré. Un mauvais fonctionnement de l'agitateur mènera à une ségrégation entre la phase aqueuse et la phase organique où la réaction exothermique de polymérisation continue. On se trouvera ainsi en face d'une couche d'eau froide (en bas) en contact avec une couche chaude de polymère (en haut) qui pourrait dépasser 400°C. Une perturbation des deux couches (en déchargeant, en remettant l'agitateur en marche) conduit à une évaporation flash du liquide froid. Par la suite, une montée rapide de la pression se produit dans le liquide froid améliorant le mélange des phases. Si une vaporisation très importante se produit pendant une courte durée, le processus ressemblerait à une explosion. (Fabiano, et al., 2002)

Nous pouvons citer aussi l'explosion qui s'est produite dans une usine de fabrication de polychlorure de vinyle (Ogle, et al., 2004). L'explosion est survenue dans une cuve de

stockage à pression atmosphérique lors du déchargement d'une suspension du réacteur de polymérisation. L'augmentation de la pression due à l'évaporation flash du chlorure de vinyle surchauffé a éclaté le toit de la cuve. Il y a eu formation d'un nuage de vapeur de chlorure de vinyle.

D'autres études concernant le comportement dynamique des bulles formées dans des gouttelettes s'évaporant lors d'une ébullition explosive dans un mélange d'hydrocarbures ont été réalisées (Park, et al., 2005). Dans ces études, une série d'expériences a été effectuée pour mesurer les limites de surchauffe de plusieurs hydrocarbures et de leurs mélanges en utilisant en premier la technique de l'explosion de la gouttelette. Le comportement dynamique de l'évolution de la bulle après l'évaporation a aussi été étudié.

D'autres auteurs ont étudié la formation des bulles de vapeur lors de l'ébullition explosive (Lee, et al., 1996) (Harigel, et al., 1999) (Hao, et al., 2000) (Koshizuka, et al., 1999) (Campos, et al., 2000) (Elias, et al., 2000) (Ivashnev, et al., 2004)

#### ***1.1.2.1.1.3 Modèle mathématique***

Un modèle mathématique phénoménologique décrivant l'augmentation d'une bulle de vapeur, produite lors d'une nucléation homogène, dans une gouttelette pendant l'ébullition explosive a été élaboré par Shusser (Shusser, et al., 1999) (Shusser, et al., 2000) Les prédictions de ce modèle corroboraient avec les résultats expérimentaux. Ce modèle va être présenté ci-dessous.

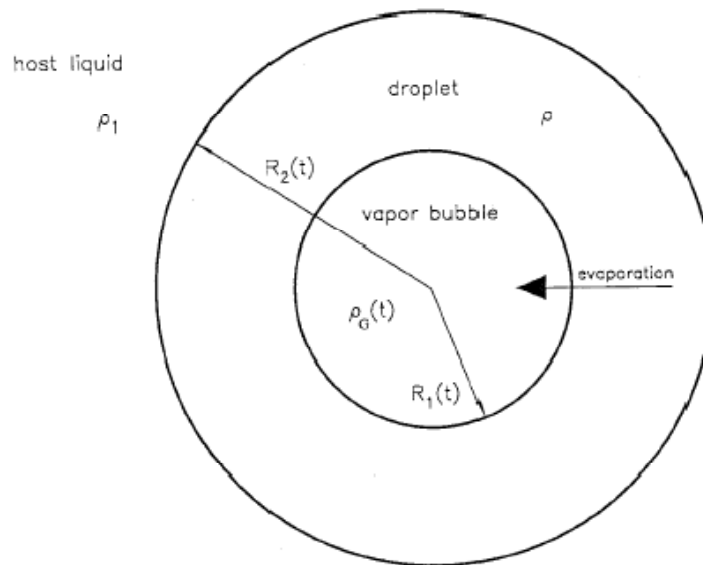


Figure I-1 Schéma d'ébullition explosive d'une gouttelette

Le modèle considère une gouttelette liquide de forme sphérique et de rayon initial  $R_0$  située dans un autre fluide. À l'instant  $t=0$ , la température de la gouttelette atteint la limite de surchauffe. L'ébullition explosive est initiée par nucléation homogène formant ainsi une bulle à l'intérieur de chaque gouttelette.

Un système de coordonnées sphériques ayant son origine au centre de la gouttelette a été utilisé. La bulle et la gouttelette ont respectivement pour rayon  $R_1(t)$  et  $R_2(t)$ .

#### I.1.2.1.1.3.1 Hypothèses

Le but de ce modèle est de calculer la variation de ces rayons en fonction du temps. Pour cela, plusieurs hypothèses ont été adoptées suites aux observations expérimentales (Shusser, et al., 2000) :

- Une seule bulle est formée à l'intérieur de la gouttelette.
- Le rayon de la bulle grandit à vitesse constante inférieure à la vitesse du son.
- Le taux d'évaporation reste approximativement constant pendant le processus
- Le processus nécessite environ  $100 \pm 200 \mu\text{s}$
- La température de la vapeur à la surface de la bulle est égale au point d'ébullition du liquide de la gouttelette.

### I.1.2.1.1.3.2 Équations du modèle

Le calcul de la variation du rayon de la bulle est donné par :

$$\text{Équation I-6} \quad \left( R_1 \ddot{R}_1 + 2\dot{R}_1^2 - 2R_1 \frac{\dot{J}}{\rho} \right) \left[ 1 - \frac{R_1}{R_2} \left( 1 - \frac{\rho_1}{\rho} \right) \right] + \frac{1}{2} \left( \dot{R}_1^2 - 2R_1 \frac{\dot{J}}{\rho} + J^2 \rho_2 R_1^4 R_2^4 \right) - \rho_1 \rho - 1 - f^2 \rho_G \rho + f^2 \rho_2 = 1, \rho [p_i - p_\infty - 2\sigma_1 R_1 - 2\sigma_2 R_2]$$

Où

- ✚ p est la pression dans la phase liquide,
- ✚  $p_i$  la pression à l'intérieur de la bulle,
- ✚  $\rho$  la masse volumique de la gouttelette,
- ✚  $\rho_G$  la masse volumique de la vapeur dans la bulle,
- ✚  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  les tensions de surface,
- ✚ les points la dérivée par rapport au temps,
- ✚ J le taux d'évaporation donné par l'équation de Hertz-Knudsen :

$$\text{Équation I-7} \quad J = p_s \sqrt{\frac{M}{2\pi RT_s \gamma}}$$

Et la variation du rayon de la gouttelette est donnée par la formule :

$$\text{Équation I-8} \quad \dot{R}_2 = \left( \dot{R}_1 - \frac{J}{\rho} \right) \frac{R_1^2}{R_2^2}$$

### I.1.2.1.2 Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE)

Le BLEVE est un phénomène physique qui peut intervenir avec tout liquide fortement pressurisé dans un réservoir étanche fermé du fait d'un chauffage intense à des températures considérablement supérieures à celle de son ébullition à pression atmosphérique. Une chute abrupte de la pression due, par exemple, à la rupture de la structure du réservoir, conduirait à une explosion (Birk, et al., 1996) (Chen, et al., 1999) (Casal, et al., 2006).

Ainsi, lors d'un incendie, le haut niveau de température de la paroi implique une pression de plus en plus forte à l'intérieur du réservoir pouvant aboutir à une rupture instantanée de la paroi et une chute abrupte de pression. Le liquide, initialement à une température largement supérieure à celle de l'ébullition sous pression atmosphérique (courbe de saturation), subit alors une évaporation partielle flash assez violente, générant une onde de pression et l'explosion du réservoir! (Stawczyk, et al., 2003). La chaleur d'évaporation est récupérée au sein même du liquide! (Berg, et al., 2004). L'ensemble du phénomène d'autovaporisation instantanée se trouve ainsi réuni. Dans le cas de substances inflammables, le BLEVE est souvent suivi par des projections.

L'explosion mécanique lors d'un BLEVE peut causer des dégâts sévères dus à la vague de pression et à la projection des morceaux. Pour cette raison, un effort considérable a été fait pour étudier ces explosions durant la dernière décennie en vue d'en limiter les risques liés aux gaz liquéfiés, produits combustibles,... (Planas-Cuchi, et al., 2004) (Casal, et al., 2006).

Un modèle simplifié a été développé pour décrire la réponse thermique du GPL lors de la rupture des réservoirs (Gong, et al., 2004). Le développement de la couche de stratification est considéré dans ce modèle. La comparaison de résultats avec les données expérimentales disponibles montre que ce modèle peut prédire efficacement la réponse thermique.

Van der berg et al. ont tenté de trouver une méthode pour calculer la puissance du souffle généré lors de l'explosion d'un réservoir contenant un gaz liquéfié. La modélisation montre qu'une rupture instantanée du réservoir génère un souffle de force considérable (Berg, et al., 2004).

Une méthode est proposée par Casal et al. pour l'estimation rapide de la surpression maximale causée par le BLEVE. La méthode est basée sur l'usage de l'énergie de surchauffe qui est la différence entre l'enthalpie spécifique du liquide à sa température avant l'explosion et l'enthalpie spécifique du liquide à sa température de saturation, à pression atmosphérique. L'analyse réalisée avec un ensemble de produits a montré que

lors d'un BLEVE l'énergie convertie en surpression varie entre 3,5 et 14% de l'énergie de surchauffe (Casal, et al., 2006).

E. Planas-Cuchi et al. ont soulevé une surestimation du calcul de la surpression dans les modèles proposés dans la littérature ; cela est due selon eux ont à des erreurs dans l'approche thermodynamique qui supposait un comportement d'un gaz parfait et une expansion isentropique. E. Planas-Cuchi et al. ont proposé une nouvelle approche en considérant une expansion adiabatique et irréversible (Planas-Cuchi, et al., 2004).

L'analyse des tout premiers risques accompagnant le BLEVE a permis de conclure qu'une zone d'exclusion avec un rayon de 300m assurerait une protection pour les gens contre toutes conséquences des explosions.

Malgré les modèles proposés, et les approches « réalistes » du phénomène, la détermination du taux d'évaporation reste difficile puisqu'il dépend des circonstances du BLEVE !

#### **I.1.2.1.3 Loss Of Coolant Accident (LOCA)**

La réponse thermo-hydraulique d'une couche stagnante de liquide suite à une chute abrupte de pression a été examinée par R.J Peterson et al. (Peterson, et al., 1984). Le liquide étudié était le Fréon-11 utilisé à température ambiante.

Les chutes de pression étaient telles que le liquide se retrouvait surchauffé et commençait à bouillir assez rapidement. Un interféromètre Mach Zehnder de 20,3 centimètres a permis de photographier une succession d'interférogrames du liquide avec une très grande vitesse.

Les résultats ont montrés que le degré de refroidissement du liquide était deux fois plus important que ce qui est prévu par la pression de saturation. En effet, avec des conditions initiales de 97,2 à 101 kPa de pression et 19,3 et 21,1 °C de température et une chute de pression de 11,4 à 27 kPa (surchauffe de 5,7°C) le degré de refroidissement était de 9,2 °C en dessous de la température de saturation !

Et le transfert de masse obtenu lors de cette chute de pression était 10 à 12 fois supérieur à celui de l'évaporation seule !

Ce phénomène a reçu une attention particulière dans l'industrie nucléaire surtout lors de la rupture du circuit de refroidissement du réacteur. Le liquide réfrigérant à une pression élevée se retrouve instantanément à l'état vapeur à pression atmosphérique suite à l'autovaporisation (LOCA).

#### **I.1.2.1.4 Refroidissement par Flash détente (Vendange)**

Le traitement par flash détente des vendanges est un processus innovant permettant de refroidir le raisin, concentrer le vin et améliorer sa qualité en augmentant la capacité d'extraction des polyphénols du raisin. P. Sebastian et al. ont construit un évaporateur flash à un seul étage et ont étudié l'évolution de la pression et de la température à l'intérieur du système. Ce procédé présente un intérêt pour l'industrie viticole grâce à son efficacité de refroidissement et sa capacité à améliorer la qualité du vin (Sebastian, et al., 2002).

Le raisin est chauffé traditionnellement à des températures variant entre 70 °C et 90 °C juste après la vendange afin d'améliorer les qualités gustatives du vin. Le refroidissement du raisin à des températures inférieures à 30°C (Températures convenables pour la fermentation) nécessite un certain temps. D'où l'intérêt d'utiliser la flash détente qui permet grâce à la détente de la vendange (mélange d'une phase liquide avec des particules solides (peau, graines, pulpes) dans une cuve à basse pression d'assurer un refroidissement rapide. Le condensat récupéré à la suite de la détente est constituée essentiellement d'eau, de sucre, de composés volatiles et d'arômes de la vendange.



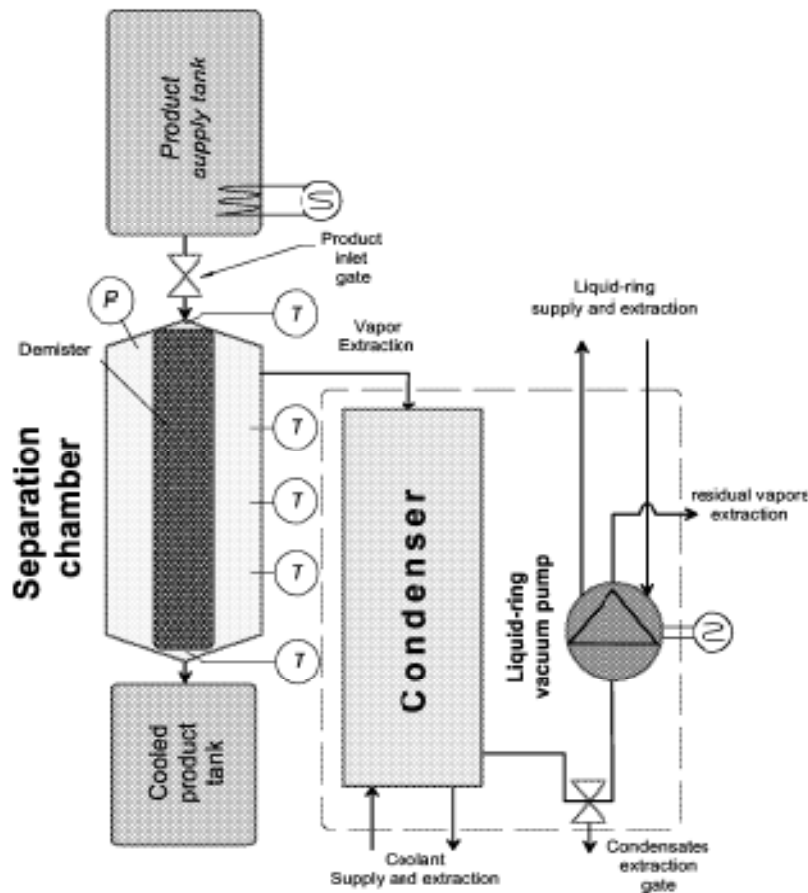


Figure I-2 Photos de l'appareillage

#### I.1.2.1.5 Flash evaporation from water pool

Des études expérimentales concernant l'évaporation flash ont été menées (Kim, 1997) (Hahne, et al., 2000) (Saury, 2003). Ces études ont permis d'analyser l'évaporation flash dans une colonne de liquide. Au cours de ses travaux de recherche, D Saury a étudié l'influence de la hauteur initiale d'une colonne de liquide et de la vitesse de chute de pression sur l'évaporation flash (Saury, 2003). En variant la hauteur de liquide entre 25 à 250 mm, la température initiale de 45 à 85 °C et le degré de surchauffe de 2 à 44 K (Saury, et al., 2005) il a visualisé moyennant une caméra CCD l'effet de ces paramètres sur l'évaporation flash vers un réservoir à vide (500 à 1500 Pa). En faisant le bilan thermique, il a déterminé la masse évaporée en fonction de la température du liquide et de quantifier l'influence de la hauteur initiale de liquide sur l'amplitude maximale du phénomène, le temps de détente et la quantité évaporée. Il a aussi analysé l'influence des vitesses de détente relativement basses (de 0 à  $3,5 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) sur la masse évaporée.

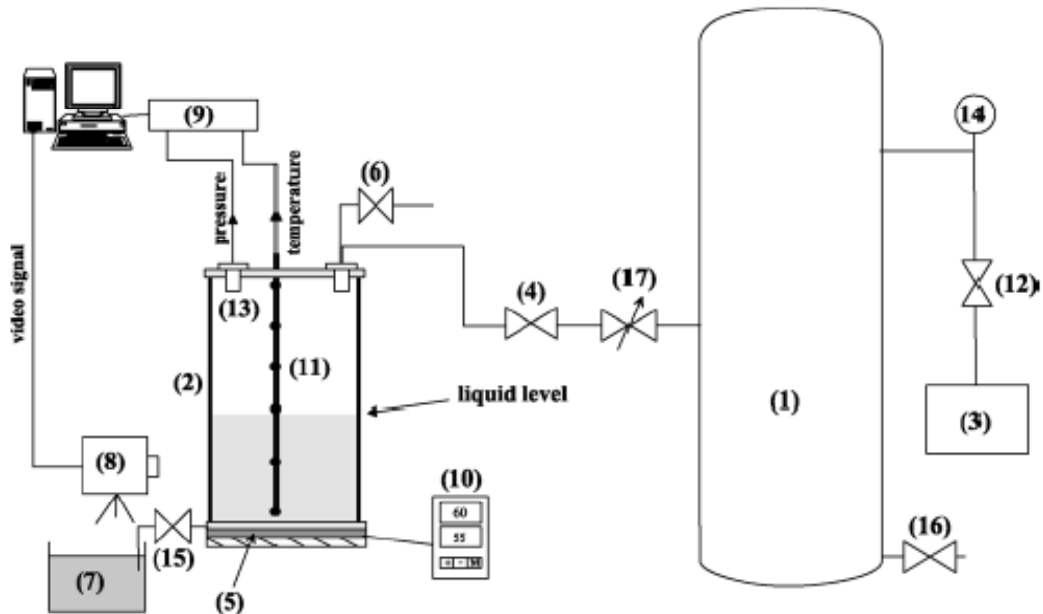


Figure I-3 Appareillage d'expérimentation. (1) Réservoir à vide ; (2) Enceinte de traitement ; (3) Pompe à vide ; (4) Vanne Electromagnétique ; (5) Plaque chauffante ; (6) Vanne de mise à l'air libre ; (7) Réservoir d'eau distillée ; (8) Caméra CCD ; (9) Système d'acquisition ; (10) Régulateur de température ; (11) Thermocouples ; (12) Vanne ; (13)(14) Capteur de pression ; (15) (16) Vanne de vidange ; (17) Vanne de control de débit (Saury, et al., 2005)

Les principaux résultats obtenus montrent que la chute de température du liquide est moins importante quand la vitesse de détente est faible.

Les études expérimentales antérieures concernant l'évaporation flash tels que l'autovaporisation d'un liquide contenu dans un réservoir par chute abrupte de pression, d'un liquide surchauffé dans un évaporateur multi-étages, d'un liquide surchauffé pulvérisé à travers une buse dans un réservoir sous vide, etc., montrent que le facteur d'autovaporisation du dernier procédé mentionné était plus de 10 fois supérieur aux autres. (Miyatake, 1994)

Tableau I-1 Les différents paramètres étudiés par différents auteurs

	Miyatake (1973– 1977)	Gopalakrishna (1987)	Saury (2002)	Saury (2003)
$T_e$ [°C]	40–80	–	–	–
$T_0$ [°C]	–	25–80	30–75	45–85
$\Delta T$ [K]	2.5–5.5	0.5–10	1–35	2–44
$H$ [mm]	100–225	165, 305, 457	15	25–250
$p_0$ [mbar]	73–473 <sup>a</sup>	30–310 <sup>a</sup>	50, 100, 150, 200	50, 150

### I.1.2.1.6 Water Flash Evaporation Cooling (WFEC)

Le refroidissement des surfaces par autovaporisation ou évaporation flash de l'eau sous de très basses pressions a fait l'objet de travaux de recherche de I. AOKI (Aoki, 1994). Il a trouvé que le transfert de chaleur lors de ce processus est très important et présente un intérêt spécial pour le refroidissement des vaisseaux spatiaux. Les résultats obtenus ont montré que l'autovaporisation instantanée (évaporation flash) possède une capacité de refroidissement très élevée sous faibles pressions et en particulier en dessous du point triple de l'eau (Aoki, 2000). Mais ce phénomène est assez instable en dessous du point triple qu'il peut causer la formation de glace réduisant par la suite l'efficacité de l'autovaporisation. Ce phénomène réalisé au dessus du point triple de l'eau permet d'obtenir un flux thermique assez élevé assurant une très haute efficacité de refroidissement. D'où son utilité pour les applications au bord des navettes spatiales où la gestion de l'eau est primordiale. Ces études rentrent dans le cadre de l'utilisation d'un évaporateur flash au bord de la navette spatiale en projet, nommée HOPE.

La formation de glace par pulvérisation sous vide a également été étudiée (Shin, et al., 2000) (Kim, et al., 2001)

La pulvérisation d'un liquide sur une surface chaude semble avoir une très haute capacité de refroidissement (Buyevich, et al., 1996). (Harvie, et al., 2001) (Robidou, et al., 2002) (Jia, et al., 2003) (Loureiro, et al., 2004) (Hsieh, et al., 2004) (Hsieh, et al., 2004). Ce procédé est largement utilisé dans l'industrie où une haute performance de refroidissement est exigée.

Beaucoup de travaux expérimentaux et théoriques ont été accomplis afin de développer des corrélations de transfert de chaleur entre les surfaces chaudes et le liquide pulvérisé

(Chen, et al., 1998) (Chen, et al., 2004) (Fard, et al., 2001). Il s'est avéré que l'efficacité de l'enlèvement de chaleur par pulvérisation dépend de la durée et de la fréquence d'injection. L'optimisation de cette capacité nécessite une connaissance simultanée de la dimension des gouttelettes ainsi que le comportement de la surface du point de vue thermique.

Moreira et al. ont étudié le refroidissement des surfaces par pulvérisation pulsée du gasoil sur une surface équipée de thermocouple à très court temps de réponse (Moreira, et al., 2007). Ils ont ainsi travaillé sur l'effet de la température initiale de la surface, de la durée, de la pression et de la fréquence d'injection sur la capacité de refroidissement

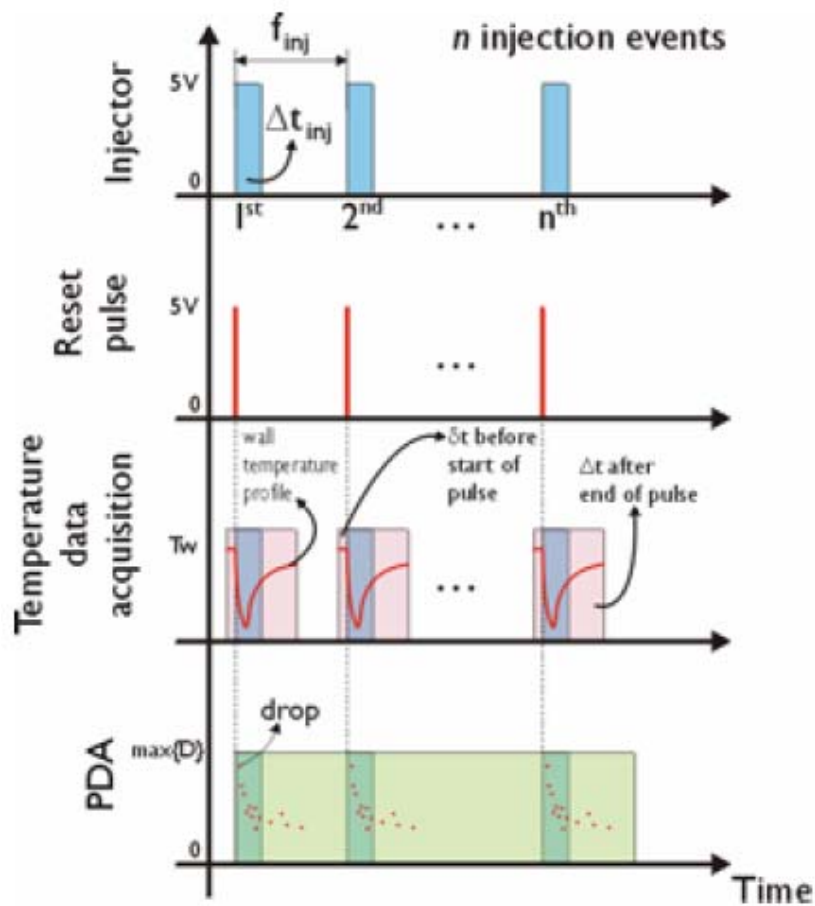


Figure I-4 (a) Appareillage de mesure, (b) Protocole d'injection et variation de la température de la surface, et du diamètre des gouttelettes en fonction du temps (Loureiro, et al., 2004)

La variation en fonction du temps de la température de la surface ainsi que le diamètre des particules sont représentés sur la figure ci-dessous :

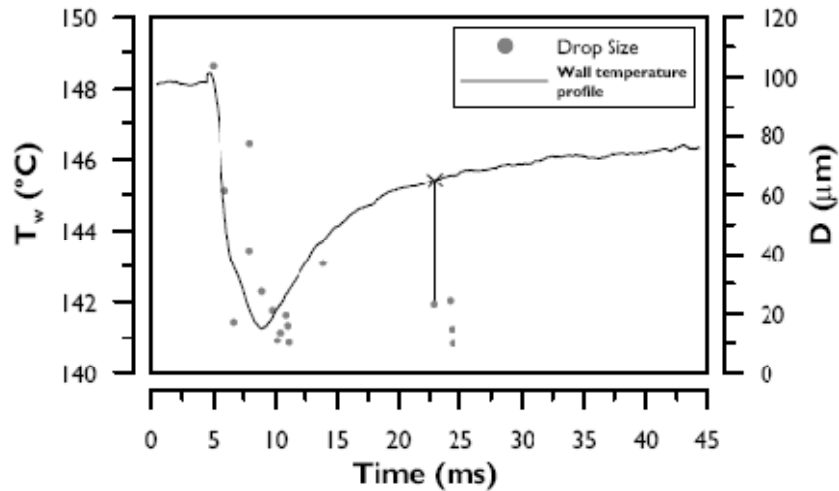


Figure I-5 Variation temporelle de la température et dimension des gouttelettes au cours d'un cycle (Moreira, et al., 2007)

Les résultats des différentes expériences menées par Loureiro et al. montrent que la capacité de refroidissement dépend étroitement de la température initiale de la surface (Loureiro, et al., 2004) (Moreira, et al., 2007).

#### I.1.2.1.7 Impulse drying

L'Impulse drying est le procédé permettant d'enlever l'eau d'un tissu de papier sous l'action combinée d'une pression mécanique et d'un chauffage intense.

Dans ce processus, le tissu de papier est mis sous une pression de 2 à 6 MPa à l'aide d'un rouleau presse qui a été chauffé au préalable à haute température entre 150 et 300°C pendant une très courte durée de 20 à 40 millisecondes (voir figure ci-dessous). Une grande partie de l'eau est évacuée par le bas sous l'effet de la pression et une autre partie est éliminée par évaporation flash à la sortie de la presse (Woods, 1998) (Bloom, et al., 1999).

Cette méthode de séchage du papier a souffert d'un point faible, connu sous le nom de délamination. Cela se produit lorsque le papier est soufflé sous l'effet de la pression développée dans les pores lors du séchage par évaporation flash.. Des efforts ont été faits afin d'empêcher ce phénomène de se produire et cela en modifiant les

caractéristiques du tissu de papier et celles du rouleau presse. (Woods, et al., 2000) ont développé un modèle pour simuler l'expansion interne d'une feuille de papier.

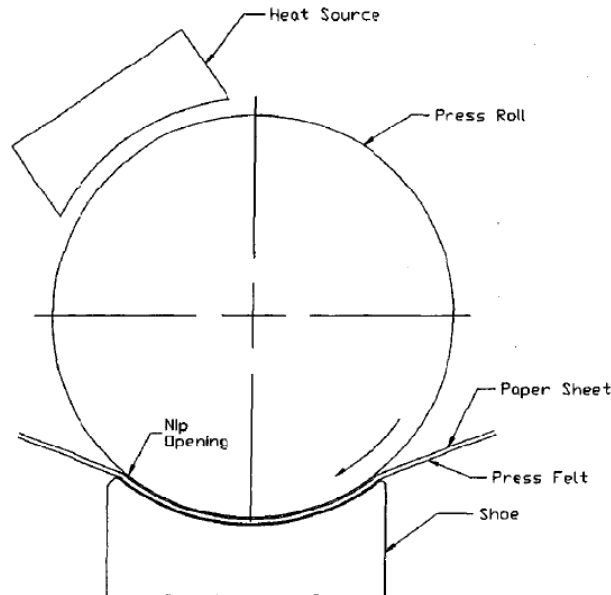


Figure I-6 Sécheur de papier utilisant la technologie "Impulse drying"

Pour mieux comprendre le phénomène de délamination WOODS et al. ont mesuré les températures à travers les couches du papier. Ils ont ainsi installé des thermocouples type E (Omega Engineering, temps de réponse < 3 ms) entre différentes feuilles de papier superposées. Ils ont préparé deux grammages différents de papier :  $80 \text{ g/m}^2$  et  $500 \text{ g/m}^2$ . Huit thermocouples ont été disposés entre les différentes couches du papier. (Lucisano, 2000)

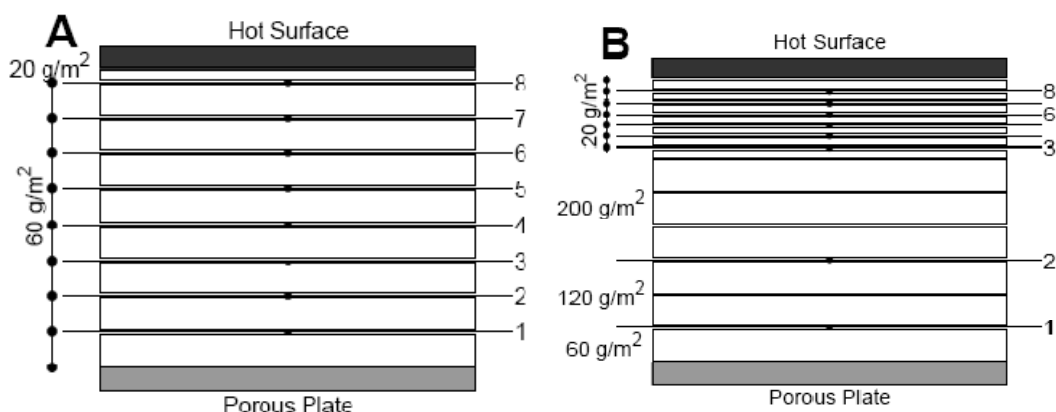


Figure I-7 Schéma de la répartition des thermocouples à l'intérieur de la couche de papier : A) papier de  $80 \text{ g/m}^2$  et B)  $500 \text{ g/m}^2$

La presse utilisée pour cette étude a été équipée d'un appareil de chauffage électrique et de thermocouples à très court temps de réponse (10 ms) pour contrôler la température de la surface extérieure du cylindre. La feuille de papier à 30 % d'humidité est comprimée sous une pression de 8,4 MPa. La durée de la compression variait entre 100 et 150 ms. La température initiale du cylindre variait entre 150 et 300 °C.

Les variations de température lors de l'impulse drying suivant les différents niveaux des thermocouples sont décrites sur les figures suivantes :

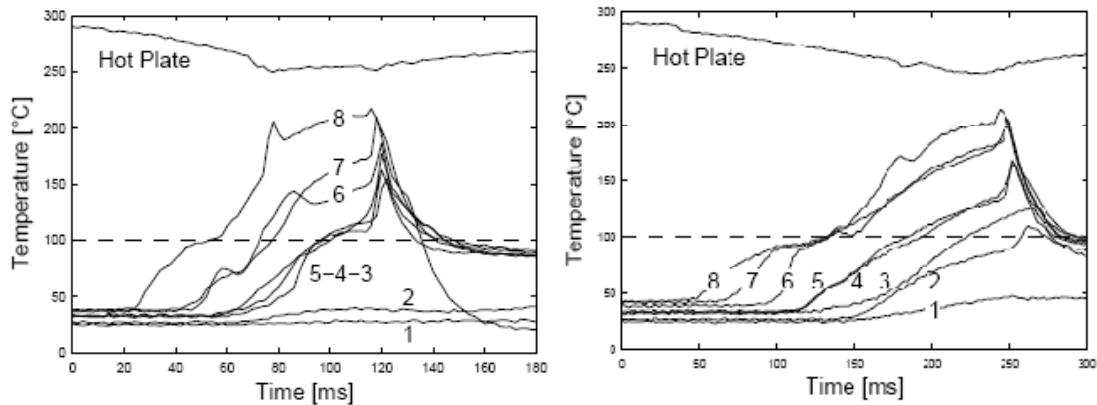


Figure I-8 Variation des températures à travers les diverses couches du papier : à gauche A ( $80\text{g/m}^2$ ) et à droite B ( $500\text{g/m}^2$ )

Ces résultats montrent que les températures des différentes couches de papier chutent en dessous de la température d'équilibre de l'eau à la pression atmosphérique ( $100^\circ\text{C}$ ) et ce phénomène est accompagné de la délamination.. Notons enfin que pour le cas du papier à  $60\text{g/m}^2$ , la température de la première couche passe instantanément à des valeurs inférieures à  $40^\circ\text{C}$ .

#### I.1.2.1.8 Cryogen Spray Cooling (CSC)

Le Cryogen Spray Cooling est un procédé utilisé pour minimiser les risques de dégâts épidermiques lors d'une chirurgie laser. Grâce à l'optimisation de ce procédé, une plus forte dose de lumière a pu être utilisée améliorant ainsi le résultat thérapeutique de beaucoup de patient avec des lésions superficielles de la peau (Aguilar, et al., 2002) (Aguilar, et al., 2003) (Svaasand, et al., 2003)

En effet, pendant le traitement des lésions de la peau avec le laser, deux absorbeurs de lumière concurrents peuvent être identifiés: la mélanine, principalement localisée dans l'épiderme, et l'hémoglobine, localisée dans les vaisseaux sanguins (PWS) visés.

Malheureusement, l'absorption d'énergie par la mélanine réduit la quantité d'énergie qui peut être absorbée par les vaisseaux sanguins, et conduit à l'échauffement de l'épiderme. Si cet échauffement n'est pas contrôlé, il conduira à la formation d'ampoules, de cicatrices et à la dépigmentation. Pour y remédier, l'application d'un jet cryogénique sur la peau pendant une très courte durée (10-100 ms) permet de refroidir la couche épidermique avant le traitement laser pendant que la température des vaisseaux sanguins (PWS) visés reste inchangée. Ce refroidissement permet aux pulsations laser de haute énergie de causer un dégât thermique au PWS tout en protégeant l'épiderme. Cependant, la diffusion thermique induit inévitablement le refroidissement des vaisseaux PWS, selon durée du jet, la température du cryogène et la qualité du contact thermique entre le cryogène et la peau (Aguilar, et al., 2000). (Aguilar, et al., 2001) (Aguilar, et al., 2001) (Aguilar, et al., 2002) (Aguilar, et al., 2003) (Aguilar, et al., 2004)

Depuis, les études se sont concentrées sur la compréhension de l'interaction avec la surface et la capacité de refroidissement.

#### ***1.1.2.1.8.1 Effets de la durée de pulvérisation et de la distance***

La variation de la température de la surface vaporisée, l'effet de la durée de pulvérisation du cryogène ( $\Delta t$ ) et la distance entre la buse de pulvérisation et la surface (L) ont été étudiés. (Majaron, et al., 2001) (Aguilar, et al., 2001) (Majaron, et al., 2002) (Karapetian, et al., 2003) (Aguilar, et al., 2003) (Aguilar, et al., 2004)

Le cryogène utilisé est le 1, 1, 1, 2 tétrafluoroéthane connu sous le nom de R-134a dont la température d'ébullition à pression atmosphérique est de  $T_b = -26^\circ\text{C}$ . Le cryogène liquide est gardé dans un réservoir métallique sous pression de saturation (660 kPa à  $25^\circ\text{C}$ ). Il est ensuite envoyé à travers un tuyau en caoutchouc vers un injecteur contrôlé électroniquement.



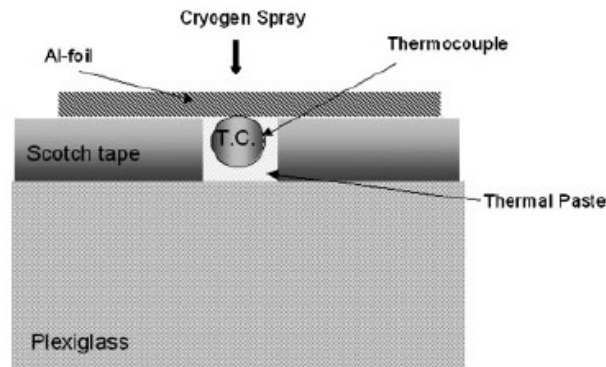


Figure I-9 Schéma de l'appareillage expérimental

Les propriétés thermiques des différents composants de l'appareillage sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau I-2 Propriétés thermiques des composantes de l'appareillage ainsi que celles de l'épiderme à titre de comparaison

Propriétés	Al	Scotch tape®	Delrin®	Plexiglass®	Epidermis
Thickness [mm]	0.020	0.050	25	19	—
$k$ [W/(m K)]	205	0.19–0.25	0.36	0.19–0.24	0.21
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2,710	1,160–1,400	1,410	1,150–1,190	1,200
$c$ [J/(kg K)]	896	1,400	1,200–1,400	1,300–1,500	3,600
$\alpha_{avg}$ [m <sup>2</sup> /second]	$844 \times 10^{-7}$	$1.22 \times 10^{-7}$	$1.96 \times 10^{-7}$	$1.31 \times 10^{-7}$	$0.486 \times 10^{-7}$

Deux types d'interaction entre la surface et le cryogène pulvérisé ont été identifiés. La transition entre ces deux types d'interaction se produit à une distance critique de la surface  $L_c = 25\text{--}30$  mm.

Pour une distance inférieure à la distance critique,  $L < L_c$  le temps de résidence  $t_r$  est plus court et dépend seulement de  $\Delta t$ , et la température minimale  $T_{min}$  est atteinte, elle dépend de  $\Delta t$  et de  $L$  en comparaison avec les paramètres obtenus quand  $L > L_c$ . où  $t_r$  dépend de  $\Delta t$  et de  $L$  et où la température ne dépend que de  $L$ .

Basés sur les résultats obtenus, le choix de la durée de pulvérisation  $\Delta t$  de 30–50 millisecondes et la distance par rapport à la surface la plus courte possible permettent d'obtenir une température minimale très basse et un temps  $t_r$  suffisamment court pour le traitement laser.

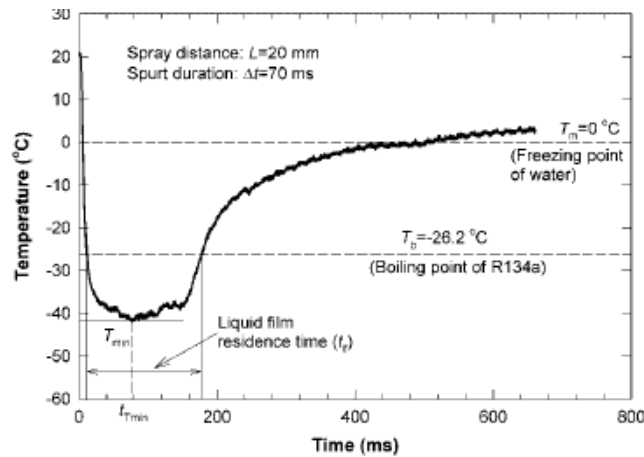


Figure I-10 Variation de la température de la surface en fonction temps pour une durée de pulvérisation de 70 ms et une distance de 20 mm

En effet, en pulvérisant la surface à une distance de 20 mm avec une durée de pulvérisation de 70 ms, la température de la surface atteint un minimum de -41°C pendant une durée de résidence de  $t_r=150$  ms. Cette température est largement inférieure à celle de saturation du R-134a à la pression atmosphérique (-26,2°C) !

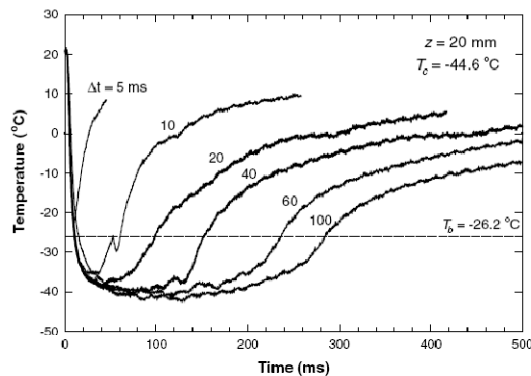


Figure I-11 Variation de la température de la surface en fonction du temps pour des durées de pulvérisation allant de 10 à 100 ms pour une distance de 20 mm (Aguilar, et al., 2003)

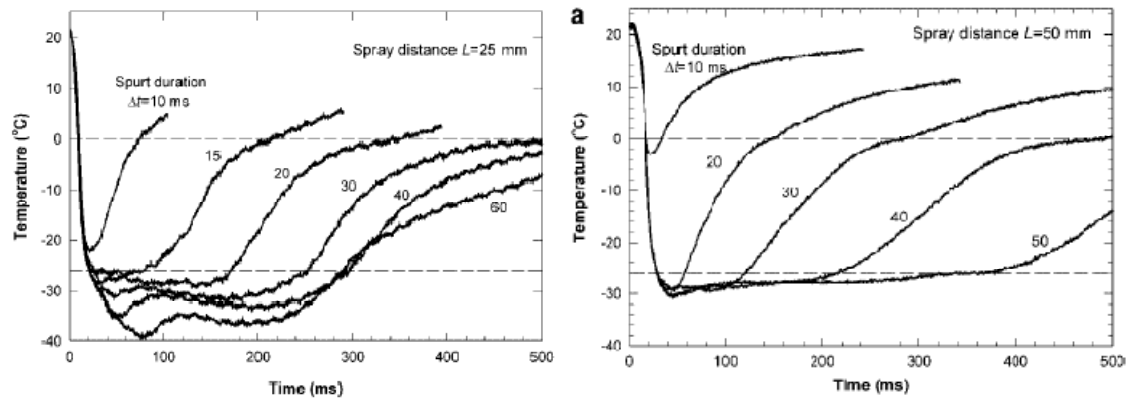


Figure I-12 Variation de la température de la surface pulvérisée en fonction de la durée de pulvérisation : A gauche pour une distance de 20mm et à droite pour une distance de 50mm (Aguilar, et al., 2003)

D'autres études ont été effectuées (Aguilar, et al., 2001) (Aguilar, et al., 2003) afin de mesurer l'effet de la durée de pulvérisation sur le transfert de chaleur.. Deux buses ont été utilisées une à  $z= 20$  mm de la surface et l'autre à  $z= 50$  mm. Le flux de chaleur moyen en surface «  $q$  » a été ensuite calculé. Les résultats ont montré que  $q$  variait tout au long de la durée de pulvérisation avec une valeur maximale obtenue aux alentours de 5-15 ms suivi d'une baisse assez rapide (Voir figures ci-dessous). Le flux de chaleur maximal variait entre 450 et 600  $\text{kW/m}^2$

Pour  $z = 50$  mm une durée de pulvérisation supérieure à 40 ms n'augmente pas la capacité de refroidissement totale  $Q$  dans les premières 200 ms. Cependant, pour  $z = 20$  mm, une durée supérieure à 100 ms est nécessaires pour obtenir la même capacité totale  $Q$ .

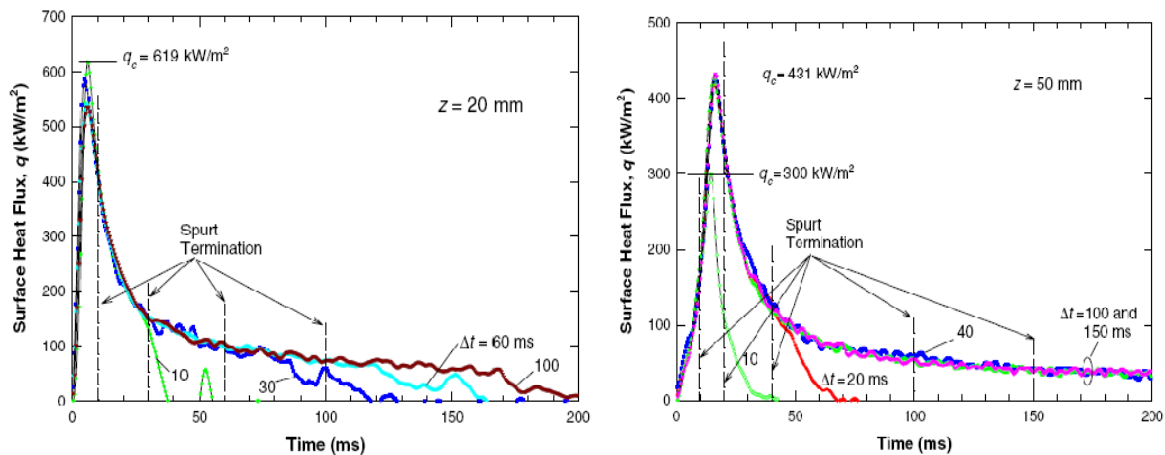


Figure I-13 Variation de la quantité de chaleur évacuée par unité de surface en fonction du temps : A gauche pour une distance de 20 mm et à droite pour une distance de 50 mm (Aguilar, et al., 2003)

### I.1.2.2 Les procédés développés au LMTAI

Issu des études théoriques du Professeur ALLAF concernant l'expansion lors de l'extrusion (Allaf, 1988) la technologie DIC est fondée sur la thermodynamique de l'instantanéité et des processus d'autovaporisation couplés à l'évolution hydro-thermo-mécanique de nombreux polymères à usage alimentaires, cosmétiques, pharmaceutique, etc. Cette technologie est capable de coupler, presque systématiquement la maîtrise de la haute qualité à la réduction du coût énergétique.

Au cours de ces vingt dernières années, le laboratoire maîtrise des technologies agro-industrielles (à l'Université de Technologie de Compiègne UTC de 1988 à 1993 et à l'Université de La Rochelle à partir de 1994) a procédé à l'étude des différents aspects des phénomènes physiques basés sur l'instantanéité. Sept familles de brevets ont été déposées à partir de 1988 (Allaf, et al., 1993) (Allaf, et al., 1998)... La DIC, en tant que technologie issue de la thermodynamique de l'instantanéité, a fait l'objet de nombreuses applications (Allaf, 1988) (Allaf, 1989) (Sahyoun, 1996) (Allaf, 2002) et plusieurs travaux de thèses de doctorat concernant le séchage (Sahyoun, 1996), (Sahyoun, 1996), le séchage/texturation (Louka, 1996), l'étuvage (Habba, 1997), le séchage du poisson (Juhel, 2000), la débactérisation (Debs-Louka, 2000), le traitement du bois archéologique (Sanya, 2000), le séchage de produits pharmaceutiques (Rakatozafy, 2001), la pulvérisation sous vide (Delgado-Rosas, 2002), le traitement de légumineuses

(Haddad, 2002) et le traitement du riz (Thai-Cong, 2002), le traitement DIC par Microondes (Klima, 2006), l'extraction de l'huile de l'ylang ylang (Kristiawan, 2006), l'extraction de l'huile essentielle du bois (Mellouk, 2007), la définition d'un atomiseur à trois étages couplant la pulvérisation à l'expansion par DIC, appliquée au cas du lait (Mounir, 2007).

#### **I.1.2.2.1 Présentation de la DIC**

La DIC est un traitement de type HTST (Haute température courte durée) qui consiste à faire subir à un produit partiellement humide (en général l'humidité varie autour de 30%) une pression de vapeur ( $P < 20$  bars) à haute température (inférieure à  $200^{\circ}\text{C}$ ) durant une courte durée (inférieure à la minute) suivie d'une chute abrupte de pression vers le vide (50 mbars,  $\Delta t < 200$  ms). Cette chute de pression est caractérisée par une très grande vitesse ( $\Delta P / \Delta t > 2,5 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

La DIC permet la restructuration et un refroidissement instantané des produits biologiques à travers l'autovaporisation d'une partie de l'eau contenue dans le produit. L'expansion qui s'en suit dépend aussi bien des propriétés du produit traité que des conditions opératoires (températures, temps de traitement...).

Après le traitement par DIC, la restructuration des produits par expansion accélère les vitesses de séchage. A travers ses études sur les légumes en morceaux, LOUKA, 1996 a montré un impact direct de la vitesse de détente et du degré de l'instantanéité de l'opération sur le taux d'expansion.

#### **I.1.2.2.2 Présentation de la Déshydratation par Détentes Successives (DDS)**

Le procédé DDS utilise principalement le phénomène d'autovaporisation déjà rencontré dans le procédé DIC, en vue de la déshydratation. La DDS se distingue donc de la DIC par le fait qu'il s'agit d'une méthode de séchage proprement dite. Au plan technique, le produit ne subit aucun traitement thermique notable; seuls de faibles échanges de chaleur avec un gaz lors du remplissage de la chambre de traitement peuvent avoir lieu. En effet, un avantage de la DDS est le travail à des températures modérées

(généralement voisines de l'ambiante), ce qui favorise son utilisation pour les produits thermosensibles.

En DDS, le produit subit une succession de cycles de mise sous pression (1 à 10 bar), suivie d'une détente abrupte vers une basse pression généralement inférieure à la pression atmosphérique. A chaque détente une partie de l'eau contenue dans le produit est éliminée par autovaporisation; la quantité évaporée dépend à la fois du système, de la structure du produit, de l'état de l'eau et des conditions opératoires utilisées (pression, température...). Le séchage par DDS fait appel à de l'air à température ambiante, comprimé en vue d'aboutir à la pression recherchée, il est tout autant envisageable d'utiliser d'autres gaz neutre.

Les études et mesures réalisées ont systématiquement montré que la quasi-totalité de la déshydratation a lieu au cours de la chute de pression ; la part liée aux deux phases de haute pression et de basse pression (vide...) respectivement est pratiquement négligeable. La déshydratation par DDS doit donc être considérée comme ayant lieu par autovaporisation.. Une deuxième constatation doit également être signalée : la nature abrupte de la chute de pression permet de générer une déshydratation quantifiée comme étant d'environ deux fois plus forte qu'une opération similaire à détentes relativement lente ( $\Delta P/\Delta t < 5.10^5 \text{Pa.s}^{-1}$ ).

### **I.1.2.2.3 Présentation de l'atomisation sous vide**

En 2002, Manuel DELGADO au cours de ses travaux de recherche a défini et mis en place un système de pulvérisation sous vide. Basé sur le principe de la technologie DIC, l'atomisation sous vide est conçue pour le traitement des produits pompables, elle consiste à pulvériser une substance liquide chauffée dans un réservoir à vide à travers une buse à partir d'une haute pression..

La quasi-totalité des résultats des mesures réalisées semblent systématiquement montrer que l'autovaporisation intervient à un niveau dépassant, quelquefois largement, les prévisions de la thermodynamique des phénomènes quasi-statiques... le niveau de la température juste à la suite de la détente abrupte issue de la pulvérisation par chute de

pression dans le vide, semble donc (largement) dépasser le niveau que doit prévoir la thermodynamique classique.

Une deuxième constatation peut être d'une importance primordiale ; il s'agit dans le cas d'une solution ainsi pulvérisée de l'évolution du niveau de concentration en soluté en fonction de la distance de séparation de la buse d'atomisation ; plus le trajet de la gouttelette pulvérisée est important, plus sa concentration en soluté est faible !

L'intérêt au plan de l'application industrielle est évident ; mais c'est surtout en termes d'impact théorique et fondamental qu'il est important d'analyser le phénomène qui semble de toute évidence confirmer les principales constatations liées à la détente instantanée

#### **I.1.2.2.4 Principaux résultats**

La vitesse de la détente présente un intérêt particulier pour le traitement des produits biologiques. En effet, les résultats obtenus lors du traitement DIC ont montré que le taux d'expansion des produits, leur surface spécifique ainsi que leur taux de refroidissement sont d'autant plus intenses quand la détente est instantanée, et lorsque la détente est très lente (quasi-statique) seules de très faibles modifications (souvent négligeables) de la structure sont notées. Les expériences de déshydratation par DDS ont montré que la vitesse de séchage est beaucoup plus importante lors d'une détente abrupte que lors d'une détente lente (quasi-statique). Notons enfin que dans le VCSD, plus on s'approche de la buse de pulvérisation sous vide et plus grande est la quantité d'eau éliminée.

### **I.1.3 CONCLUSION**

Nombreuses opérations et expérimentations réalisées, impliquent l'autovaporisation... Les études et quantifications expérimentales montrent un impact systématique de l'instantanéité sur la température minimale atteinte et par conséquent sur la quantité évaporée. Le 1<sup>er</sup> principe implique une liaison étroite entre les deux. Malgré les nombreuses études réalisées, aucune analyse fondamentale n'a été établie.

Pourtant le dépassement de l'état d'équilibre quasi-statique : Température et quantité (ou débit) d'eau vaporisée prévues remet en question le deuxième principe au plan de

l'étape intermédiaire... Le deuxième principe reste applicable dès que l'équilibre est atteint.

Malgré les nombreuses applications aucune étude thermodynamique classique n'a pu expliquer les phénomènes observés ; seule l'analyse théorique spécifique aux phénomènes d'instantanéité proposée par ALLAF en 2002, sera à la base de l'explication et l'étude de ce type d'autovaporisation.



## Chapitre I.2

### PROBLEMATIQUES DU SECHAGE : CINETIQUE ET QUALITE

Les phénomènes d'autovaporisation que nous avons étudiés dans le cadre du présent travail ont eu dans le domaine du séchage des applications directes à travers la DDS et un impact indirect à travers la texturation par DIC qui, par modification de la structure, induit une modification de la diffusivité de la matière (eau) au sein de la matrice solide. Dans ce chapitre, nous allons présenter les phénomènes se déroulant lors du séchage des produits alimentaires par air chaud, par microondes et par DDS ainsi que l'ensemble des théories et modèles proposés.

#### I.2.1 LE SECHAGE

##### I.2.1.1 Intérêt du Séchage

Le séchage est une des principales opérations industrielles. Il constitue une part considérable de l'activité de l'industrie agroalimentaire, présent généralement sous deux opérations unitaires d'évaporation – concentration des liquides et déshydratation en vue de sécher les produits solides.

Les mots « séchage » et « déshydratation » peuvent donc être indifféremment utilisés dans l'industrie agroalimentaire (denrées alimentaires) alors que pour les autres industries, c'est seulement le mot séchage qui est employé.

Dans le cas des denrées alimentaires, le séchage est un procédé très ancien visant la conservation, la stabilisation des denrées périssables par abaissement de leur activité d'eau jusqu'à une valeur inférieure à 0,5. Pendant le processus de séchage, l'eau est enlevée sous forme de vapeur par l'air. Le séchage des produits peut être obtenu :

- *par évaporation ou par ébullition :*
  - sous pression atmosphérique à l'aide d'un courant d'air chaud,
  - sous vide par chauffage :
  - ✓ par contact direct avec une surface solide chaude

✓ par rayonnement ;

- *par sublimation lors de la lyophilisation*

L'utilisation de la basse pression permet de chauffer à des niveaux de température plus faibles afin de réduire la dégradation thermique de certains produits. La qualité et le prix du produit séché sont étroitement liés à la durée et au niveau de température ; ces paramètres dépendent de l'activité de l'eau du produit. La qualité du produit est souvent jugée à partir de ses qualités nutritionnelles, hygiéniques et organoleptiques (forme, couleur, goût et arôme, degré de dégradation thermique, ...). Quand les produits séchés sont utilisés sous des formes réhydratées, la structure, la forme et la densité du produit jouent un rôle très important dans sa reconstitution.

Le séchage dans les industries agro-alimentaires permet :

- D'accroître la durée de conservation des produits et réduire leur poids pour le transport (fruits, légumes, viandes,...),
- De stabiliser des coproduits industriels pour l'alimentation animale (pulpes de sucrerie ou d'amidonnerie, drêches de brasserie,...) ;
- De produire des PAI, produits alimentaires intermédiaires, utilisés comme ingrédients ou additifs pour une seconde transformation. Ce sont par exemple les légumes pour les potages, les fruits pour la pâtisserie,... (Bonazzi, et al.).

Le séchage implique des opérations couplées de chaleur et de masse (de l'eau sous des formes liquides ou vapeur). Le transfert de chaleur a pour but de fournir l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau. Le transfert de chaleur est gouverné par le gradient de température alors que le transfert de masse dépend des gradients, au sein du produit, de la concentration en eau liquide, de la pression partielle de vapeur d'eau, de la pression totale ; l'élément moteur du séchage est cependant le gradient de pression partielle de vapeur d'eau entre la surface du produit et l'air ou plus généralement le milieu extérieur (Bonazzi, et al.) (Peczalski, et al.) Dans le cas de séchage convectif, l'air chaud a donc deux rôles essentiels: apporter les calories nécessaires à l'évaporation de l'eau, et emporter la vapeur d'eau. L'humidité de l'air chaud est donc une propriété essentielle gouvernant le séchage ; l'activité de l'eau du produit et la température à

laquelle est opérée la déshydratation, sont également essentielles à la maîtrise des processus (Ealre, et al., 2004).

### I.2.1.2 Teneur en eau d'équilibre

Quand la pression partielle de la vapeur d'eau à la surface intime d'un produit maintenu à une température fixe atteint celle de l'air environnant, les deux milieux (produit et air) se trouvent en état d'équilibre, sans pour autant qu'ils n'aient la même « humidité » ; cet équilibre établi se traduit par l'absence de tout transfert d'eau sous forme vapeur. L'humidité d'équilibre, noté souvent EMC, dépend de la température, de la teneur en humidité  $M_e$  et du produit. Plusieurs équations mathématiques tentent de traduire cette dépendance selon la nature des produits étudiés (Wilhelm, et al., 2004). L'humidité relative d'équilibre (ERH) entre l'air et le produit peut être exprimée par :

Équation I-9 :  $ERH = \exp\left(\frac{-K}{M_e^N}\right)$  HALSEY

Équation I-10 :  $ERH = 1 - \exp(-KTM_e^N)$  HENDERSON

Équation I-11 :  $ERH = 1 - \exp(-K(T + C)M_e^N)$  HENDERSON modifiée

Équation I-12 :  $ERH = \exp\left(\frac{\exp(K+CT)}{M_e^N}\right)$  HALSEY modifiée

Où :

- ✚ T est la température en °C,
- ✚  $M_e$  la teneur en eau du produit en pourcentage %,
- ✚ C, K et N sont des constantes qui dépendent du produit.

Tableau I-3 Constantes des équations modifiées de Henderson et de Halsey (Wilhelm, et al., 2004)

Grain	<i>K</i>	<i>N</i>	<i>C</i>	Equation
Beans, pinto	4.4181	1.7571	-0.011875	10.07
Beans, white	0.1633	1.567	87.46	10.06
Canola meal	0.000103	1.6129	89.99	10.06
Corn, shelled	$6.6612 \times 10^{-5}$	1.9677	42.143	10.06
Popcorn	$1.5593 \times 10^{-4}$	1.5978	60.754	10.06
Peanut, kernel	3.9916	2.2375	-0.017856	10.07
Pumpkin seed, adsorption*	$3.3725 \times 10^{-5}$	3.4174	1728.729	10.06
Pumpkin seed, desorption*	$3.3045 \times 10^{-5}$	3.3645	1697.76	10.06
Rice, med grain	$3.5502 \times 10^{-5}$	2.31	27.396	10.06
Soybean	2.87	1.38	-0.0054	10.07
Wheat, hard red	$4.3295 \times 10^{-5}$	2.1119	41.565	10.06

### I.2.1.3 Facteurs de contrôle du séchage

Deux phénomènes séparés sont impliqués lors du séchage. Premièrement, l'eau se déplace de l'intérieur du produit vers sa surface et deuxièmement cette eau s'évapore dans l'air. Le transfert d'eau de l'intérieur du produit vers sa surface s'effectue soit par action capillaire soit par diffusion. Le transfert par capillarité se produit seulement pendant la première phase du séchage. Il continue ensuite par diffusion de vapeur d'eau dans le produit (Peczalski, et al.) (Besson, et al., 2000).

Mujumdar et al. citent les mécanismes suivants de transfert d'humidité dans le produit (Mujumdar, et al., 2000) :

- Diffusion liquide quand la température du produit est inférieure à celle de l'ébullition,
- Diffusion de vapeur, nécessitant une évaporation au sein de la matière,
- Diffusion Knudsen, si les niveaux de température et de pression sont très basses (Lyophilisation),
- Diffusion en surface (possible mais toujours pas prouvée),
- Différence de pression hydrostatique, quand le taux d'évaporation interne est supérieur au taux de transfert de la vapeur de la matière vers le milieu environnant,
- Combinaisons des mécanismes ci-dessus.

Notons enfin que la structure du produit est assujettie à des modifications tout au long du séchage conduisant au changement des mécanismes de transfert (Sjoholm, et al., 1995) (Elustondo, et al., 1996) (Krokida, et al., 2003)

Le taux d'évaporation dépend des conditions de séchage telles que les caractéristiques de l'air et la concentration d'eau en surface. Considérons par exemple le séchage d'une tranche de pomme ayant une forte concentration d'eau en surface (Sjoholm, et al., 1995) Au fur et à mesure que le séchage avance, l'eau en surface s'évapore et la surface devient légèrement sèche. Le transfert d'eau de l'intérieur vers la surface n'étant pas aussi rapide que l'évaporation, le séchage se trouve limité par le phénomène de transfert de matière (Peczalski, et al.) ! Cependant, en général les facteurs suivants doivent être considérés :

- ✓ La nature du produit (Composition, humidité,...)
- ✓ La dimension, la forme, et la disposition des morceaux à sécher;
- ✓ La pression partielle de vapeur d'eau de l'air
- ✓ La température et la vitesse de l'air

Le phénomène de croûtage est aussi un facteur important dans le séchage des produits solides. Il se produit lors du séchage à haute température et sous faible humidité relative quand l'évaporation d'eau en surface est beaucoup plus importante que la diffusion interne d'eau. En fait, ce phénomène réduit considérablement le séchage des produits et cela suite à la formation d'une couche imperméable et dure en surface. (Bonazzi, et al.)

Le séchage ne saurait se limiter à une simple opération (complexe) de transferts couplés de chaleur et de masse ; sa complexité est d'autant plus importante qu'il est accompagné de changements physiques pouvant affecter les qualités des produits séchés. Nous en citons le rétrécissement, la cristallisation, la transition vitreuse... Dans quelques cas, des réactions biochimiques ou biologiques peuvent également avoir lieu menant ainsi aux changements de couleur, texture et/ou odeur.

## **I.2.1.4 Retrait et Rétrécissement**

### **I.2.1.4.1 Analyse du phénomène**

Le « retrait » est, dans le cas des produits biologiques, un phénomène physique intervenant dès les premières phases du séchage. En effet, la présence d'un gradient d'eau liquide induit un déséquilibre mécanique de pression au sein de la matière, y engendrant des contraintes qui mènent à son rétrécissement (écroulement). (Sjoholm, et al., 1995) (Mayor, et al., 2004) (Talla, et al., 2004)

Ce changement du volume extérieur affecte la qualité du produit déshydraté et devrait être pris en considération comme élément de détermination de l'humidité et du profil de température dans la matière séchée. Le mécanisme de rétrécissement, sa modélisation et son impact ont fait l'objet de nombreuses études. Les modèles ont été classés dans deux groupes : les modèles empiriques (issus des données expérimentales) et les modèles fondamentaux (basés sur l'interprétation physique de la structure de la matière en vue de prédire les changements dimensionnels dus à la variation du volume des différents constituants du produit le long du processus du séchage). Une approximation empirique permet généralement de lier directement le volume « perdu » par la matière au cours du séchage à celui de l'eau éliminée.

#### ***I.2.1.4.1.1 Impact qualitative et cinétique***

En plus des problèmes de perte de qualité organoleptique menant à des produits généralement durs et de mauvaise capacité de réhydratation, le phénomène de retrait engendre une diminution significative de la vitesse de séchage. Le phénomène, distinct de la diminution de l'activité de l'eau (qui est de nature thermodynamique) est de type cinétique, étroitement lié à la diminution de la diffusivité en raison de la diminution de porosité.

Ce changement du volume extérieur affecte la qualité du produit déshydraté et devrait être pris en considération comme élément de détermination de l'humidité et du profil de température dans la matière séchée. Le mécanisme de rétrécissement, sa modélisation et son impact ont fait l'objet de nombreuses études. Les modèles ont été classés dans

deux groupes : les modèles empiriques (issus des données expérimentales) et les modèles fondamentaux (basés sur l'interprétation physique de la structure de la matière en vue de prédire les changements dimensionnels dus à la variation du volume des différents constituants du produit le long du processus du séchage).

### **I.2.1.5 Cinétiques de séchage**

La caractérisation du comportement des produits alimentaires et biologiques lors du séchage est réalisée expérimentalement par la mesure de la cinétique de séchage. Dans ce qui suit, nous allons présenter le séchage par entraînement des produits solides placés dans un courant d'air parfaitement maîtrisé (température, humidité, vitesse)

### **I.2.1.6 Périodes de séchage**

Les courbes - types utilisées pour décrire l'évolution du produit au cours du séchage sont :

- *la teneur en eau base sèche moyenne du produit en fonction du temps :  $W=f(t)$  ;*
- *la vitesse de séchage ( $-dW/dt$ ) en fonction de la teneur en eau base sèche ( $W$ ) appelée courbe de Krishner. (Charreau, et al.)*

Il est couramment admis la présence de trois périodes de séchage (Charreau, et al.) (Peczalski, et al.) (Bonazzi, et al.)... :

- *une période 0 de mise en température du produit, traduisant l'introduction du produit dans le séchoir, son changement de température et donc de pression de vapeur d'eau en surface  $p_s$  : quand le produit est initialement froid, le débit de matière est faible alors que l'écart de température entre l'air et la surface du produit induit un grand débit thermique. Le chauffage (de la surface) du produit accroît (très rapidement) la pression de vapeur d'eau ( $p_s$ ) ainsi que le débit de vapeur loin du produit ; la quantité de chaleur augmente jusqu'à ce que le bilan d'énergie s'équilibre. Si, au contraire, le produit est initialement à température élevée, il se refroidit au contact de l'air (convection) et par évaporation jusqu'à atteindre un certain équilibre en termes de débit d'énergie.*

- *une période 1 de séchage à vitesse constante, qui correspond à l'évaporation superficielle de l'eau libre. Le produit reste en dehors du domaine hygroscopique, l'activité de l'eau dans le produit ( $a_w$ ) en surface reste proche de 1, et le séchage est contrôlé par les transferts externes. Pendant toute cette période, la température du produit est uniforme, constante et égale (par définition) à la température humide ( $\theta_h$ ) de l'air de séchage. À la fin de cette période, on peut déterminer la teneur en eau critique du produit. Durant cette période, l'eau s'évapore en surface du produit et toute l'énergie nécessaire au changement d'état est prélevée dans l'air et uniquement dans l'air. Il s'y forme une couche limite de gaz où la pression de vapeur d'eau est quasi égale à celle de l'eau pure dans les mêmes conditions de température et de pression. Cette situation résulte soit de la présence d'eau en quantité importante à la surface du produit, soit d'une diffusion d'eau, du sein du produit vers sa surface externe, suffisamment rapide. Cette phase est comparable à l'évaporation d'un liquide. Pendant toute la durée de cette phase qui se poursuit jusqu'au point critique, la surface du produit est saturée en eau. La vitesse de séchage diminue pour s'annuler lorsque le produit est à l'équilibre*
- *une période 2 de séchage à vitesse décroissante. La surface du produit passe sous la limite supérieure du domaine hygroscopique, l'activité de l'eau ( $a_w$ ) en surface du produit est inférieure à 1 et les transferts internes de matière deviennent limitants. La température du produit augmente alors à partir de sa surface. La teneur en eau du produit diminue jusqu'à atteindre une valeur limite ( $W_{lim}$ ) qui dépend des conditions de l'air de séchage; le surplus d'énergie est converti en chaleur sensible : le produit voit sa température (et donc sa pression de vapeur) s'élever, d'abord en surface, puis au centre jusqu'à tendre asymptotiquement vers la température de l'air. Le débit de matière diminue car le gradient de pression de vapeur est de plus en plus faible. Par un effet opposé d'augmentation de température et de diminution de teneur en eau, le produit tend vers un nouvel équilibre enthalpique dans lequel la différence de température entre l'air et la surface du produit diminue. Le taux d'humidité à partir duquel la vitesse de séchage se met à décroître est le taux d'humidité critique, qui n'est pas toujours identifiable et, quand il est observé, dépend des conditions de séchage. L'eau migre de plus en plus difficilement dans le produit et le transfert interne de*



matière devient le phénomène limitant. La diffusivité de l'eau variant beaucoup avec la teneur en eau, le produit sec est de plus en plus imperméable à l'eau. À cela s'ajoutent :

- la concentration des solutés en surface ;
- les phénomènes de « croûtage » et de durcissement de la surface ;
- la résistance éventuelle des parois cellulaires lorsqu'elles n'ont pas été altérées par un traitement thermique (cuisson ou blanchiment).

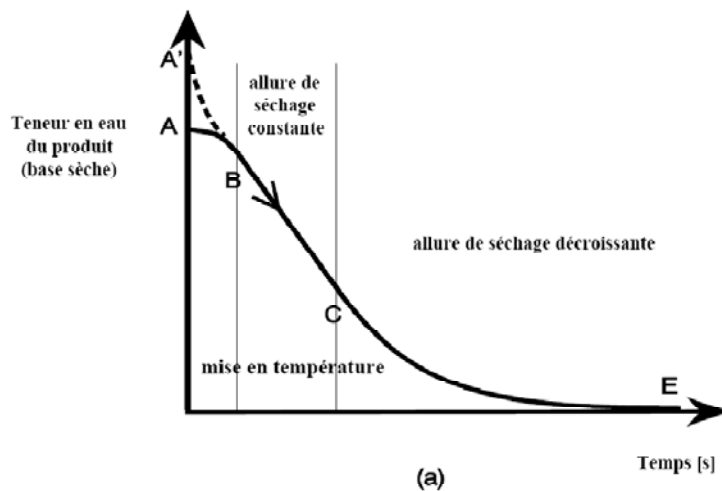


Figure I-14 Variation de la teneur en eau du produit en fonction du temps lors du séchage par entraînement (Besson, et al., 2000)

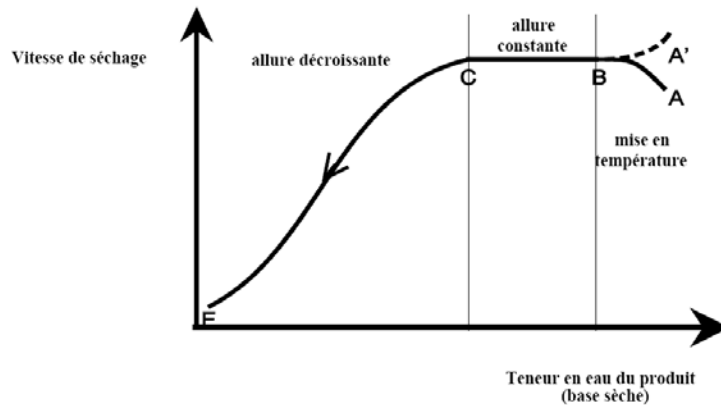


Figure I-15 Variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau du produit (Besson, et al., 2000)

La période transitoire de mise en température du produit AB ou A'B est assez courte et décrit l'influence de la température initiale du produit (Voir Figure I-15 et Figure I-16). La deuxième période BC est une allure de séchage constante. Durant cette période, il y a toujours assez d'eau libre pour mouiller constamment la surface du produit. L'activité

d'eau de celui-ci est proche de 1. Les transferts de chaleur et de masse à l'intérieur du produit sont rapides, et le mécanisme limitant la vitesse de séchage est la résistance aux transferts de masse et de chaleur à la surface du produit. Lorsque la surface du produit n'est plus constamment mouillée, on entre dans la période CE à allure décroissante: le mécanisme limitant la vitesse de séchage devient alors la diffusion de la vapeur d'eau à l'intérieur du produit.

Durant la période de séchage à allure constante, il y a de l'eau libre toujours présente à la surface du produit. La température du produit durant cette période sera égale à la température humide de l'air de séchage, c'est-à-dire ne dépendra que des propriétés (température et humidité) de l'air. Cette phase stationnaire (la température reste constante) indique que l'énergie thermique entrant dans le produit est égale à l'énergie consommée pour évaporer l'eau. Le débit d'évaporation est donné par:

$$\text{Équation I-13 : } \frac{dM}{dt} = kA(p_w(T_w) - p) \frac{M_w}{RT}$$

Où :

- ✚ k est le coefficient de transfert de masse
- ✚ A est la surface d'échange produit-air
- ✚  $p_w(T_w)$  est la pression de vapeur saturante de l'eau à la température humide  $T_w$
- ✚ p est la pression de vapeur d'eau dans l'air
- ✚  $M_w = 18 \text{ kg/kmole}$ ,
- ✚ T est la température absolue de l'air
- ✚ R est la constante des gaz parfaits :  $R = 8314 \text{ J/kmole } ^\circ\text{K}$ .

Le débit de chaleur est lui égal à:

$$\text{Équation I-14 : } \frac{dQ}{dt} = hA(T - T_w)$$

Où :

- ✚ h est le coefficient de transfert de chaleur par convection,

✚ T est la température de l'air [°C], appelée parfois température sèche

✚  $T_w$  est la température humide de l'air [°C],

Si  $L_w$  est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, l'allure constante de séchage est caractérisée par :

Équation I-15 : 
$$\frac{dQ}{dt} = L_w \frac{dM}{dt}$$

En général, pour les produits alimentaires et biologiques, il est rare d'avoir la période de séchage à vitesse constante ; cependant, la période de séchage à vitesse décroissante est souvent divisée en deux ou trois sous-périodes qui correspondent à des changements structuraux dans le matériau.

Dans tous les cas, une augmentation de la température de l'air de séchage se traduit par une augmentation du potentiel de séchage et par une accélération du procédé. La plupart du temps en effet, les résistances externes sont négligeables et le séchage est contrôlé par les résistances internes au transfert de matière. La migration d'eau interne est limitée par :

- *la résistance des parois cellulaires ;*
- *la migration des solutés qui obstruent les pores ;*
- *le durcissement et la rétraction de la surface du produit.*

En réalité, ce phénomène dépend de la valeur de la vitesse de l'air de séchage : à faible vitesse, les résistances internes et externes au transfert de matière sont comparables, alors qu'au-delà d'une certaine valeur critique de  $v_a$ , le procédé est contrôlé par le transport interne.

### **I.2.1.7 Propriétés thermiques fruits et légumes en morceaux**

La conductivité thermique constitue l'une des propriétés thermiques les plus importantes pour la détermination du transfert de chaleur par conduction lors du séchage, congélation,... (Saravacos, et al., 1996) (Willix, et al., 1998) (Becker, et al., 1999) (Fontana, et al., 2001) (Białobrzewski, et al., 2006) Pour prédire l'évolution de la conductivité thermique des fruits et légumes pendant le séchage différents modèles ont

été proposés dans la bibliographie (Donsi, et al., 1996) (Kostaropoulos, et al., 1997) (Rahman, et al., 1997) (Fontana, et al., 1999) (Maroulis, et al., 2002)... Ces modèles prennent en compte le phénomène de retrait, la masse volumique spécifique, la teneur en eau et la température des produits.

L'eau dans les produits biologiques, à l'inverse de la matière sèche, joue un rôle essentiel dans la détermination de la conductivité thermique. Cela est dû à la conductivité élevée de l'eau par rapport à celle de la matière sèche.

La conductivité thermique des produits alimentaires diminue avec la diminution de la teneur en eau. La présence des alvéoles d'air à l'intérieur du produit participe à la réduction de cette conductivité. Une approche linéaire est généralement utilisé pour déterminer la conductivité thermique en fonction de l'humidité du produit, les paramètres de corrélation dépendent de la nature du produit. Or pour couvrir un large intervalle d'humidité (0 à 100 %) une corrélation non linéaire est nécessaire.

Un modèle généralisé a été développé par Rahman et al. en 1997 pour prédire la variation de la conductivité thermique des fruits en légumes tout au long de leur séchage (Rahman, et al., 1997). Ce modèle, basé sur celui de Krischer, prenait en compte le phénomène de retrait ainsi que la structure de chaque produit.

Le modèle de Krischer suppose qu'un milieu poreux est formé par la juxtaposition de couches alternées de solide, d'air et d'eau. Soit  $f_k$  la fraction volumique du système (comprise entre 0 et 1) disposée perpendiculairement à la direction du flux thermique et  $(1 - f_k)$  la fraction complémentaire, parallèle au flux; la conductivité thermique apparente du milieu poreux est donnée ainsi par la relation:

Équation I-16 
$$\lambda_e = \frac{1}{\left(\frac{1-f_k}{\lambda_{pa}} + \frac{f_k}{\lambda_{se}}\right)}$$

Où  $\lambda_e$  est la conductivité thermique effective du produit,  $f_k$  est le facteur de distribution de Krischer,.

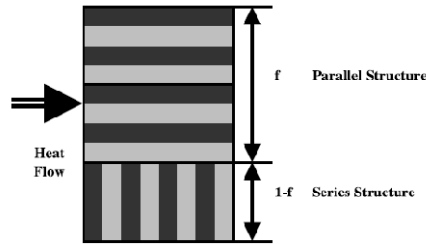


Figure I-16 Modèle mixte de la conductivité thermique

$\lambda_{pa}$  et  $\lambda_{se}$  sont les conductivités thermiques respectives de la structure en parallèle et de la structure en série, elle s'écrivent :

$$\text{Équation I-17} \quad \lambda_{pa} = \varepsilon_s \lambda_s + \varepsilon_w \lambda_w + \varepsilon_a \lambda_a$$

$$\text{Équation I-18} \quad \lambda_{se} = \frac{1}{\left(\frac{\varepsilon_s}{\lambda_s} + \frac{\varepsilon_w}{\lambda_w} + \frac{\varepsilon_a}{\lambda_a}\right)}$$

Où

$\lambda_s$ ,  $\lambda_w$  et  $\lambda_a$  sont les conductivités thermiques respectives du solide, de l'eau et de l'air, leurs valeurs pour des substances pures sont données par la littérature en fonction de la température. et  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_w$  et  $\varepsilon_a$  sont les fractions de volume de chacun des composants, elles peuvent être déterminées à partir de l'humidité ( $X$ ), de la masse volumique spécifique ( $\rho_a$ ), la masse volumique réelle du produit ( $\rho_t$ ) et la masse volumique du solide ( $\rho_s$ ).

$$\text{Équation I-19} \quad \varepsilon_a = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_t}$$

$$\text{Équation I-20} \quad \varepsilon_w = \frac{X}{(1+X)} \frac{\rho_a}{\rho_w}$$

$$\text{Équation I-21} \quad \varepsilon_s = \frac{1}{(1+X)} \frac{\rho_a}{\rho_s}$$

Les masses volumiques spécifiques et réelles peuvent être déterminées en fonction de l'humidité  $X$ , l'humidité initiale  $X_i$ , le coefficient de retrait  $\beta$ , la masse volumique spécifique initiale ( $\rho_{ai}$ ) et la masse volumique de l'eau ( $\rho_w$ )

$$\text{Équation I-22} \quad \rho_t = \frac{(1+X)}{\left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{X}{\rho_w}\right)}$$

$$\text{Équation I-23} \quad \rho_a = \frac{(1+X)}{\left(1 + \frac{X_i}{\rho_{ai}} + \beta \frac{(X-X_i)}{\rho_w}\right)}$$

D'autres auteurs ont essayés de déterminer la conductivité thermique à travers la connaissance de la composition des produits en carbohydrate, protéines, fibres, eau,... Les principales formules proposées dans la bibliographie peuvent être résumées dans le tableau ci-dessous (Ici, k représente la conductivité, généralement représentée par  $\lambda$  dans notre texte) :

Tableau I-4 Principales formules de détermination de la conductivité thermiques des produits biologiques

Auteur	Année	Humidité	Température	Porosité	Conductivité Thermiques W/mK	Remarques
Rahman	1997	14% to 94%	5°C to 100°C	0,0 à 0,56	$k_c = \varepsilon_a k_a + f_r [(1 - \varepsilon_a - \varepsilon_w) k_s + \varepsilon_w k_w]$ .	
Krisher	1972	20% to 60%	0°C to 350°C		$k_c = 1 / \left( \frac{1 - f_k}{k_{pm}} + \frac{f_k}{k_{sc}} \right)$	
Choi & Okos	1983				$k = \frac{Q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln \left( \frac{t_2 - t_0}{t_1 - t_0} \right)$	
Pham & Willix	1989				$k = k_f + b(T - T_f) + c \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_f} \right)$ $k = k_f + d(T - T_f)$	Produits riches en eau
Riedel			0°C à 180°C		$k = (326.58 + 1.0412T + 0.00337T^2)(0.46 + 0.54M_w)(1.73 \times 10^{-3})$	$M_w$ est la teneur en eau
Sweat		> 60% 60% to 80%	0°C à 60°C		$k = 0.148 + 0.439M_w$ $k = 0.08 + 0.52M_w$	
Choi & Okos					$k = 0.2051M_c + 0.2M_p + 0.175M_f + 0.135M_a + 0.61M_w$	
Choi & Okos					$k = \sum k_i E_i$ $E_i = \frac{M_i / \rho_i}{\sum (M_i / \rho_i)}$ Protein $k = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3} T - 2.7178 \times 10^{-6} T^2$ Carbohydrate $k = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3} T - 4.3312 \times 10^{-6} T^2$ Fat $k = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-3} T - 1.7749 \times 10^{-7} T^2$ Ash $k = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3} T - 2.9069 \times 10^{-6} T^2$ Water $k = 5.7109 \times 10^{-1} + 1.7625 \times 10^{-3} T - 6.7036 \times 10^{-6} T^2$ Ice $k = 2.2196 - 6.2489 \times 10^{-3} T + 1.0154 \times 10^{-4} T^2$	

### I.2.1.7.1 Transferts internes

Les produits alimentaires sont des milieux polyphasiques et hétérogènes. Ils sont constitués principalement :

- d'eau, solvant et plastifiant de base, majoritaire dans les aliments non déshydratés ;

- de glucides (sucres) qui englobent les oses (par exemple, le glucose dans le miel, les fruits à l'état naturel) et leurs associations condensées appelées osides dont le saccharose (sucre de canne et de betterave), le lactose (sucre du lait), la cellulose (paroi cellulaires des végétaux), l'amidon (réserve de glucose pour les végétaux) ;
- de lipides (matières grasses) qui englobent les acides gras et leurs esters dont les glycérides (réserve d'acides gras pour les végétaux et les animaux) qui constituent 95 % des corps gras de l'alimentation ;
- de protides qui englobent les acides aminés et leurs composés peptidiques appelées protéines, par exemple : la caséine (lait), l'ovalbumine (blanc d'œuf), le gluten (graines de blé), la gélatine ;
- de sels minéraux (par exemple, les chlorures de calcium, de potassium, de sodium) ;
- de vapeur d'eau et d'air pour les produits foisonnés ou poreux.

#### **I.2.1.7.1.1 Transfert de matière**

L'eau migre de l'intérieur vers la surface du produit sous l'action de divers mécanismes qui peuvent se combiner. Il est généralement admis que le transport capillaire est l'un des mécanismes fondamentaux dans les produits poreux riches en eau (Chen, et al., 2002) (Ruiz-Lopez, et al., 2004). Dans les produits alimentaires, on préfère souvent attribuer le transport d'eau à une diffusion d'eau liquide/ vapeur sous l'effet du gradient de concentration. L'évolution de teneur en eau s'exprime en fonction du gradient de teneur en eau et d'une diffusivité globale qui regroupe les différents phénomènes de transport, dans une loi analogue à la seconde loi de Fick :

$$\text{Équation I-24 : } \frac{\partial w}{\partial t} = D_{\text{app}} \nabla^2 w$$

Où  $D_{\text{app}}$  est la diffusivité apparente (exprimée en  $\text{m}^2/\text{s}$ ) qui, le plus souvent, varie avec la température et la teneur en eau du produit et est affectée par rétrécissement du matériau. Cette relation est souvent appliquée pour interpréter globalement les transferts de matière, tout en sachant qu'elle n'est pas correcte du point de vue phénoménologique.

Dans les aliments,  $D_{app}$  varie entre  $10^{-12}$  et  $10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s (Bonazzi, et al.); sa prédiction nécessite des données expérimentales et varie beaucoup d'un auteur à l'autre, selon le type d'expériences réalisées et la méthode d'estimation choisie.

#### **I.2.1.7.1.2 Transfert de chaleur**

La chaleur diffuse dans le produit sous l'effet du gradient de température. La loi de Fourier, qui caractérise la diffusion de chaleur dans un milieu immobile en négligeant l'effet de la migration d'eau s'écrit :

$$\text{Équation I-25 : } \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + Q$$

Où :

- ✚  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) est la masse volumique du matériau,
- ✚  $c$  est la capacité calorifique (J.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>),
- ✚  $\lambda$  est la conductivité thermique (W.m<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>),
- ✚  $T$  est la température (°C),
- ✚  $t$  le temps,
- ✚ et  $Q$  la quantité de chaleur générée en volume (W.m<sup>-3</sup>) (Microondes, ...).

Nous notons enfin que lors d'un séchage conventionnel (air chaud)  $Q$  est égal à 0.

Les valeurs de  $\rho$ ,  $c$  et  $\lambda$  peuvent dépendre de la température, le problème deviendra ainsi non linéaire. Beaucoup d'études ont été réalisées (Sjoholm, et al., 1995) (Saravacos, et al., 1996) (Fontana, et al., 1999) (Richardson, 2001) (Talla, et al., 2004) ... afin de déterminer l'ensemble des propriétés thermo-physiques des produits alimentaires.

#### **I.2.1.7.2 Transferts externes**

Au cours d'un séchage par entraînement, la vapeur d'eau est éliminée de la surface du produit par convection. La chaleur est transférée par convection de l'air vers la surface, et éventuellement par rayonnement (infrarouge ou microonde) ou par conduction (si le produit est posé sur une plaque ou sur un tapis chauffant). L'air en contact du produit est considéré en équilibre de température et d'humidité avec la surface du produit.



La quantité de chaleur échangée entre le produit ayant une surface d'échange S et l'air s'écrit sous l'une des deux formes suivantes :

$$\text{Équation I-26 : } \frac{dQ}{dt} = hS(T - T_a)$$

Ou par:

$$\text{Équation I-27 : } \frac{dQ}{dt} = hS(T_a - T_s)$$

Où

- ✚  $T_a$  est la température de l'air en contact avec la surface du produit
- ✚  $T_s$  est la température de la surface du produit
- ✚  $h$  est le coefficient de convection ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )
- ✚  $T$  est la température de l'air

Le débit de matière échangée quant à lui peut être exprimé par :

$$\text{Équation I-28 : } \frac{dM_w}{dt} = k_m S(p_a - p)$$

Ou par:

$$\text{Équation I-29 : } \frac{dM_w}{dt} = k_m S(p_s - p_a)$$

- ✚  $k_m$  est le coefficient de transfert de masse ( $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ )
- ✚  $p_a$  est la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air à la surface du produit
- ✚  $p_s$  est la pression partielle de vapeur d'eau en surface du produit
- ✚  $p$  est la pression partielle de vapeur d'eau de l'air

#### ***1.2.1.7.2.1 Phénomènes limitant***

La vitesse à laquelle s'effectue le séchage est liée à la cinétique des transferts internes et externes de matière et de chaleur. Ces transferts correspondent à des mécanismes que l'on peut considérer comme disposés en parallèle ou en série (Maroulis, et al., 1995) (Lim, et al., 2004). Dans ce dernier cas, c'est le mécanisme le plus lent qui constitue

l'étape limitante et qui détermine la vitesse du procédé. Lors du séchage par entraînement d'un produit biologique, c'est le plus souvent le transfert interne de matière qui correspond au phénomène limitant.

### **I.2.1.8 Les Microondes**

Les hyperfréquences ou microondes s'intègrent dans un ensemble continu, le spectre électromagnétique, qui s'étend depuis les courants alternatifs de basse fréquence jusqu'aux rayons cosmiques. Ils occupent dans le spectre électromagnétique une bande de trois décades (300 MHz à 300 GHz) borne d'un côté par les radiofréquences de la gamme VHF, et de l'autre par l'infrarouge lointain. (Voir figure ci-dessous)

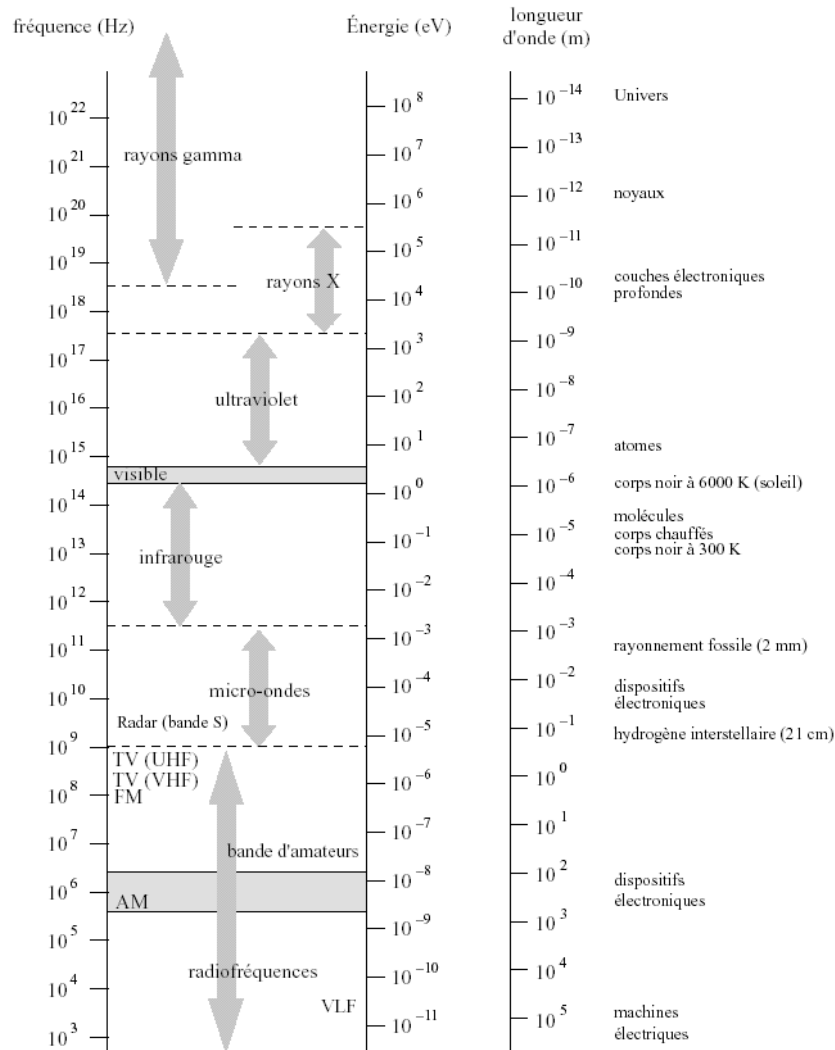


Figure I-17 : Spectre des ondes électromagnétiques. A droite, on donne les sources typiques. (Thuery, 1999)

On peut diviser les applications des microondes en deux catégories, suivant que l'onde hyperfréquence est porteuse d'information ou non c'est à dire un simple vecteur d'énergie.

A la première catégorie appartient les télécommunications, la télédistribution...

La seconde catégorie est celle qui nous intéresse, elle se caractérise par la mise en œuvre de puissances continues élevées et par l'absence de la modulation de la porteuse. Le rayonnement électromagnétique habituel (infra-rouge, lumière visible) ont une pénétration extrêmement limitée dans la matière (du fait de leurs faibles longueurs d'onde). Les microondes ont des longueurs d'onde centimétriques ou décimétriques du

même ordre de grandeur que les dimensions des objets à chauffer. Il s'ensuit des profondeurs de pénétration également du même ordre.

#### **I.2.1.8.1 Traitement par microondes**

Le traitement des matériaux par microondes est relativement une nouvelle technologie permettant d'obtenir de nouvelles approches afin d'améliorer les processus physiques de chauffage des produits, fournir des alternatives pour le traitement des matériaux difficiles à traiter.

La principale spécificité des microondes en tant que source de chaleur est son pouvoir pénétrant dans les matériaux ce qui a pour intérêt de réduire le temps de traitement et d'avoir une meilleure qualité des matériaux traités. L'économie de l'espace est une autre raison d'utilisation des microondes. Un certain nombre de facteurs peuvent être pris en compte afin d'adapter ou non l'utilisation des microondes :

- *. La géométrie: Ex les dimensions des produits à traiter, et la difficulté d'utiliser les autres procédés de chauffage,...*
- *. La température : sensibilité,; ex. les produits thermiquement sensibles.*
- *. Coût : il faudrait que le coût des produits à traiter soit assez élevé pour tolérer le traitement par microondes.*

Un élément important du développement des microondes et de la conception des systèmes est la possibilité de modéliser les interactions entre la matière et l'onde électromagnétique.

Une compréhension de la variation des propriétés diélectriques avec la température et l'humidité (plus généralement la composition) est importante pour des simulations et des modélisations du processus.

La modélisation par ordinateur peut être employée pour optimiser la conception des générateurs et applicateurs, et réaliser des simulations réelles du processus avec des propriétés précises de l'échantillon (propriétés diélectriques, dimension, ...), et les états de traitement désirés.

### I.2.1.8.2 État actuel du traitement par microondes

Certains traitements par microondes des produits alimentaires sont listés dans le tableau suivant :

Figure I-18 : Applications du traitement par microondes

Traitement	Produits
Cuisson	Viande, pomme de terre
Séchage	Pâte, Oignons, riz
Séchage sous vide	Grains
Stérilisation	Lait
Blanchiment	Maïs, pomme de terre,

Le paramètre le plus important dans le traitement microondes est  $\tan\delta$ , il indique la capacité du produit à transformer l'énergie absorbée en chaleur. Ainsi il faut avoir une combinaison d'un  $\varepsilon'$  modéré permettant une bonne pénétration et une perte élevée ( $\varepsilon''$ maximale). (Thuery, 1999)

Pour le traitement par microondes il faut trouver les produits qui soient polarisable, dont le dipôle s'oriente rapidement avec le changement du champ électrique.

Heureusement, beaucoup de produits et spécialement les produits alimentaires répondent à ces exigences. Cependant si la conductivité thermique des matériaux est faible, la chaleur n'est pas dissipée rapidement dans les régions environnantes du matériel quand une région devient chaude. (la perte diélectrique augmente fréquemment considérablement à mesure que la température augmente.)

### I.2.1.8.3 Interaction entre les microondes et la matière

Les processus de chauffage par microondes peuvent être illustrés en considérant que le produit a une conduction électronique  $\sigma_e$ , une conduction ionique  $\sigma_i$  et une permittivité complexe  $\varepsilon' - i\varepsilon''$ . En présence d'un champ électrique, E, dans le produit un courant doit circuler.

Équation I-30 :  $E = e^{i\alpha}$

Selon les équations de Maxwell, la densité du courant  $j$  est :

$$\text{Équation I-31 : } j = [\sigma_e + \sigma_i + i\omega\varepsilon_0(\varepsilon' - i\varepsilon'')]E = i\omega\varepsilon_0\varepsilon'E + \omega\varepsilon_0\varepsilon' \tan \delta E$$

Où :

$$\text{Équation I-32 : } \tan \delta = \frac{(\sigma_e + \sigma_i) / \omega\varepsilon_0 + \varepsilon''}{\varepsilon'}$$

L'angle de phase,  $\delta$ , est relié au délai impliqué en polarisant le produit. La quantité  $\tan \delta$  est la tangente de perte, le paramètre le plus important dans le traitement de microonde.

Retournant à l'équation, le premier terme à la droite de l'équation est la composante du courant qui est en opposition de phase avec le champ électrique.

C'est le courant de déplacement qui stocke l'énergie électrique dans le matériel. L'énergie électrique moyenne stockée par volume unitaire est :

$$\text{Équation I-33 : } W = 1/2\varepsilon_0\varepsilon'E^2$$

Le deuxième terme de l'équation (23) est la composante qui est en phase avec le champ électrique. A travers ce terme, l'énergie des microondes est convertie en chaleur.

La valeur moyenne de l'énergie convertie en chaleur par unité de volume est:

$$\text{Équation I-34 : } P = 1/2\varepsilon_0\varepsilon' \tan \delta E^2$$

Ainsi, la tangente de perte caractérise la capacité du matériel à convertir la puissance des microondes absorbée en chaleur, avec une absorption qui dépende de l'intensité du champ électrique, de la fréquence, du facteur de perte, et de la constante diélectrique.

Un matériel avec  $\tan \delta$  et  $\varepsilon''$  élevés chauffe plus efficacement qu'un matériel avec faible  $\tan \delta$  et faible  $\varepsilon''$ .

#### **I.2.1.8.4 Eau et diélectriques aqueux**

Du fait de sa configuration asymétrique, la molécule d'eau présente une polarité exceptionnelle, qui en fait le matériau idéal pour le chauffage par microondes.

Les deux atomes d'hydrogène forment un angle de 105 ° dont le sommet est l'atome d'oxygène. La distance O-H est de 0.096 nm. Le moment dipolaire résultant dirigé suivant la bissectrice de l'angle HOH, est estimée à  $0.62 \cdot 10^{-29}$  C.m.

#### **I.2.1.8.5 Séchage par microondes**

Le séchage des produits alimentaires par microondes a fait l'objet de nombreuses études. Ces dernières ont concernés essentiellement les cinétiques de séchage, la combinaison des microondes avec d'autres processus de séchage tels que l'air, la lyophilisation, le vide,..., et la modélisation du chauffage et du séchage par microondes (Hill, 1996) (Funebo, et al., 1998) (Sakai, et al., 2005) (Klima, 2006).

Parmi les intérêts que présentent les microondes pour le séchage, nous citons :

- *La dissipation de l'énergie électromagnétique dans la masse du produit. On parle ainsi d'un chauffage à distance,*
- *La sélectivité du chauffage; en effet il est fonction de la permittivité diélectrique des produits considérés,*
- *L'efficacité et la rapidité du chauffage électromagnétique,*
- *Le gain de temps par rapport aux techniques classiques.*
- *La préservation de la forme et des qualités nutritionnelles et organoleptiques (surtout quand le séchage est effectué sous vide ou par lyophilisation)*

Pourtant, le séchage par microondes ne semble pas une solution directe aux problèmes de qualité et de process industriel du séchage. En effet, la première étape de l'opération de séchage par air chaud n'implique qu'un chauffage « intense » de la surface du produit ; la faible température relative du volume du corps réduit considérablement la dégradation thermique de la matière. Les microondes, impliquant un chauffage du volume, induisent au cours de cette première étape du séchage un taux de dégradation nettement supérieur. D'autre part, le séchage par microondes présente également quelques autres désavantages tels que :

- *Le coût très élevé des installations Microondes,*

- *L'hétérogénéité du chauffage par microondes donnant naissance à des gradients de température à l'intérieur du produit.*

### **I.2.1.9 Séchage par DDS**

Les premiers travaux de recherches portant sur la DDS concernent l'étude de faisabilité de l'application de la DDS pour le séchage d'un gel de collagène destiné à un usage pharmaceutique, chirurgicale, dermatologique ou cosmétique. L'étude expérimentale a permis d'aboutir à des temps de séchage du gel de collagène extrêmement courts (environ 4h, contre 10h par convection forcée à 27°C et plus de 100h par convection naturelle à température ambiante), et à une préservation de la qualité des protéines. La DDS a ainsi permis d'obtenir un gel de collagène sous la forme intéressante de film fin et malléable pour l'usage final, alors que la lyophilisation, bien que préservant la qualité des protéines, ne pouvait offrir qu'un produit à structure spongieuse poreuse non souhaitée.

Toujours dans le domaine des produits thermosensibles, l'équipe du laboratoire maîtrise des technologies agro-industrielles (LMTAI) a montré que le séchage de plasma sanguin par DDS était possible à des températures inférieures à 27°C, donc sans risque de dénaturation thermique des différentes fractions protéiques. Le temps de séchage était cinq à six fois inférieur à celui d'un séchage convectif à 27°C. Des essais complémentaires de séchage par DDS ont aussi été réalisés sur le radis noir. Le but atteint avec succès était de ne pas détériorer les activités enzymatiques du végétal au cours du séchage.

Le procédé DDS a aussi été testé pour d'autres types de produits biologiques.

L'amélioration des propriétés rhéologiques du scléroglycane suite à un séchage par DDS a pu être mise en évidence (Rezzoug, et al., 2000) L'effet répété des détentes et des évaporations rapides d'eau induites auraient généré plus de zones amorphes dans le produit, provoquant une transition d'une partie du polymère, d'une conformation "pelote" à une conformation "triple hélice", permettant une meilleure mobilité des molécules. Dans le meilleur des cas, la vitesse de dissolution (estimée par une mesure de couple développé lors de la réhydratation des molécules, en réacteur agité) des



échantillons de scléroglycane traités par DDS étaient presque deux fois plus importante que pour un échantillon témoin séché sur un séchoir rotatif sous vide.

Le séchage par DDS a été utilisé pour le séchage de cubes de poisson et de produits de la mer, dans le cadre d'une étude comparative avec d'autres méthodes de séchage (JUHEL, 2000). Parmi toutes les méthodes testées (lyophilisation, séchage sous vide, séchage convectif avec ou sans DIC), la DDS a permis d'obtenir les cinétiques de séchage les plus rapides (moins de 7h). En ce qui concerne la qualité du produit, la couleur originelle des produits était assez bien respectée, de plus le retrait était moins important que lors des séchages traditionnels. En revanche, la formation d'une croûte fait que les produits traités par DDS sont beaucoup moins facilement hydratables que les produits lyophilisés ou re-texturés par DIC.

La faisabilité du séchage d'herbes aromatiques par le procédé DDS a été également démontrée. Les temps de séchage étaient une fois de plus meilleurs que pour le séchage classique à l'air chaud. De plus, la qualité des produits obtenus, caractérisée par une conservation de la couleur et du goût du produit frais ainsi qu'un maintien du volume des brins coupés dans le cas de la ciboulette, était satisfaisante et meilleure que celle des produits séchés à l'air chaud.

La DDS a également été étudiée et utilisée pour le séchage du bois frais et du bois archéologique gorgé d'eau (Sanya, 2000) Les vitesses de séchage ont été classées dans l'ordre décroissant comme suit: DDS, séchage sous vide, séchage convectif, lyophilisation. Utilisé dans des domaines restreints de pression ( $P_h < 0,5$  bar), le procédé DDS a permis d'obtenir des échantillons de bois secs de bonne qualité: absence de changement de couleur, absence de fissures et une déformation minime des échantillons, proche de celle obtenue après la lyophilisation qui, malgré son coût élevé, est la méthode de référence pour le bois archéologique.

#### **I.2.1.9.1 Synthèse sur l'influence des paramètres de la DDS**

Pour les différentes applications de la DDS, des études à variation systématique des paramètres opératoires ou utilisant la méthodologie des plans d'expériences ont été

menées pour déterminer l'effet de quelques paramètres du procédé essentiellement sur la cinétique du séchage, mais aussi parfois sur la qualité du produit.

#### ***1.2.1.9.1.1 Effet des paramètres de la DDS sur le séchage***

##### 1.2.1.9.1.1.1 Effet du niveau de pression haute ( $P_h$ ) et du niveau de pression basse ( $P_b$ )

En général, l'augmentation du niveau de pression est favorable à la diminution du temps de séchage. La vitesse de séchage ainsi que l'efficacité du séchage apparaissent comme des fonctions linéaires augmentant quand le niveau de pression haute augmente et le niveau de la pression du vide diminue. Quelques résultats semblent mettre en évidence l'importance du rapport  $P_h/P_b$  (Voir Paragraphe §II.2.4.1.1.2)

##### 1.2.1.9.1.1.2 Effet de la durée des cycles

La durée totale d'un cycle est importante, il intervient sur le nombre de détentes pour un même laps de temps. Un cycle court permet un séchage rapide, du fait d'un plus grand nombre de détentes, mais diminue l'efficacité de chaque cycle (quantité d'eau éliminée au cours d'un cycle). Les paramètres qui jouent sur la durée totale d'un cycle sont la durée du palier haut ( $D_{ph}$ ), la durée du palier bas ( $D_{pb}$ ) et éventuellement le temps de la détente. Il faut toutefois préciser que l'étude séparée de chacun des effets de ces différentes durées sur la cinétique de séchage n'est pas simple car pour une même durée de cycle, ces paramètres sont interdépendants et d'autre part ils interviennent aussi sur le niveau de vide. Le niveau de vide sera une fonction de la durée du cycle, durée pendant laquelle la pompe soutire les molécules présentes dans le système.

F. Juhel a mis en évidence que le temps de séchage est une fonction linéaire négative de  $D_{pb}$  et une fonction linéaire positive de  $D_{ph}$ . En revanche, dans une certaine limite liée aux capacités techniques (pompe à vide, principalement), un cycle court peut être moins efficace qu'un cycle long. (Juhel, 2000) Pour mettre en évidence l'effet de la détente proprement dite, il a procédé à la comparaison du procédé DDS comportant plusieurs détentes à une situation similaire de séchage sous vide permanent en l'absence de la détente ; le séchage DDS s'est avéré nettement plus rapide. L'intérêt de la détente est de favoriser, d'une part le séchage par autovaporisation de l'eau contenue dans le produit,

surtout quand on se trouve à des températures supérieures à la température de saturation correspondant au niveau de vide  $P_b$ , et d'autre part de générer une réduction considérable de la pression de vapeur d'eau au voisinage de la surface du produit ; cette réduction a été expliquée par les grandes vitesses d'air au voisinage du produit lors de la détente ou, plutôt, par la similitude d'élimination de différentes phases gazeuses : air et vapeur d'eau.

Notons, d'autre part, que la détente peut aussi créer des fissures au sein de la matrice solide.

#### ***1.2.1.9.1.2 Cinétique de séchage et qualité des produits***

Il est évident que dans un domaine de température donné, l'augmentation de la vitesse de séchage induit une amélioration de la qualité des produits finis en raison de la diminution des risques d'oxydation ou de dénaturation thermique (herbes aromatiques, fruits en morceaux ...). Il a été d'autre part noté pour les produits de la mer que le croûtage était moins prononcé après séchage par DDS qu'après les autres opérations de séchage, lyophilisation mise à part.

L'effet de la détente sur la qualité des produits a, plus particulièrement été analysé dans le cas des levures (taux de survivance de DDS quatre fois supérieur à celui de la lyophilisation) et des radis noirs (préservation activités enzymatiques par DDS).

Par contre, l'analyse fondamentale de l'ensemble de la cinétique de l'opération, basée sur l'autovaporisation, les raisons de l'influence de la pression et de l'instantanéité etc. n'ont pas encore été pertinemment étudiées.

**PARTIE II.**

**ETUDES FONDAMENTALES DE**

**L'AUTOVAPORISATION ET DU SECHAGE**



## **Chapitre II.1**

### **THERMODYNAMIQUE DE L'INSTANTANEITE : APPROCHE FONDAMENTALE**

A partir de ses études théoriques sur l'expansion lors de l'extrusion (Allaf, 1988) la technologie de Détente Instantanée Contrôlée (DIC) a trouvé son point de départ. Basée sur les phénomènes instantanés, la DIC a permis de développer au sein de l'équipe de recherche du Laboratoire Maîtrise des Technologies Agro-Industrielles une activité de recherche spécifique qui se traduit par de nombreuses études et qui ont trouvé de différentes applications industrielles.

Malgré les nombreuses études réalisées sur les phénomènes instantanés dans les opérations d'autovaporisation, aucune explication thermodynamique n'a pu justifier les énormes quantités de vapeur générées et les importantes vitesses de séchage lors d'une détente abrupte de pression par comparaison à une détente lente (quasi-statique), ni les très basses températures de surfaces obtenues lors du refroidissement par pulvérisation,...

En 2002, K. ALLAF a proposé une analyse théorique spécifique aux phénomènes d'instantanéité (approche asymptotique) (Allaf, 2002) Dans ce chapitre, nous allons, à partir de cette approche asymptotique, présenter une approche fondamentale nous permettant de déterminer l'évolution de la température des produits lors des phénomènes « instantanés ». Cette étude fondamentale nous permettra ainsi d'expliquer les phénomènes observés lors des processus instantanés.

#### **II.1.1 ANALYSE THEORIQUE DES PHENOMENES D'INSTANTANEITE**

Dans son analyse théorique, K. ALLAF sépare les transformations en deux catégories : les transformations simples et les transformations complexes.

##### **II.1.1.1 Les transformations simples :**

Les transformations simples sont des transformations qui font intervenir un seul paramètre. Elles évoluent systématiquement vers un équilibre thermodynamique global.

En effet, les transformations simples ne peuvent se réaliser instantanément, le paramètre en question évolue en fonction du temps suivant des lois linéaires ou non-linéaires. A titre d'exemple nous pouvons citer :

- le transfert de chaleur (Lois de Fourier) :

$$\text{Équation II-1} \quad \rho_p c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_p \nabla T)$$

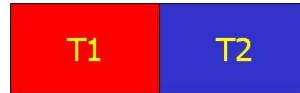


Figure II-1 Exemple de Transfert de Chaleur selon la loi de Fourier, Conduction entre deux matériaux solides en contact ( $T_1 > T_2$ )

- le transfert de masse (Lois de Fick)

$$\text{Équation II-2} \quad J_a = -D_{a,b} \frac{\partial C_a}{\partial x} \text{ (1}^{\text{ère}} \text{ loi de Fick)}$$

$$\text{Équation II-3} \quad \frac{\partial C_a}{\partial t} = D_{app} \nabla^2 C_a \text{ (2}^{\text{ème}} \text{ loi de Fick)}$$

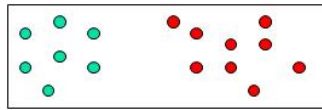


Figure II-2 Exemple de transfert de masse selon les lois de Fick, Mélange de deux gaz différents

### II.1.1.2 Les transformations complexes :

Les transformations complexes sont des transformations qui font intervenir plusieurs paramètres. Elles peuvent être réalisées d'une façon abrupte (instantanée), en générant une entropie totale nulle. En effet, l'évolution d'un ou plusieurs paramètres vers l'équilibre thermodynamique entraîne l'évolution d'autre(s) paramètre(s) qui vient s'opposer à l'équilibre.

A titre d'exemple, dans le cas d'une transformation faisant intervenir deux paramètres telles que la pression et la température, un changement abrupte de la pression fait que la température évolue en s'opposant à l'équilibre mécanique (AL HADDAD &al. 2006)

### II.1.1.2.1 Hiérarchie des paramètres thermodynamiques

Selon ALLAF, lors d'une évolution non-uniforme, une hiérarchie s'établit entre les différents paramètres pour atteindre l'équilibre. Ainsi, lors d'une transformation complexe, une priorité s'établit en fonction du temps afin d'aboutir à l'équilibre total ; par exemple: l'équilibre mécanique s'établit en premier, suivi de l'équilibre de phase (pression partielle) et ensuite l'équilibre de température... Une étude plus approfondie fera partie des perspectives de ce présent travail.

### II.1.1.2.2 Entropie totale nulle

Les transformations thermodynamiques sont caractérisées par la recherche de l'équilibre ce qui se traduit par une quantité d'entropie totale générée positive. (Exemple : La détente de Joule dans une enceinte adiabatique: Bien qu'il n'y ait pas d'échange de chaleur  $Q=0$ , la quantité d'entropie totale  $\Delta S$  est positive).

K. ALLAF (Allaf, 2002) propose que le débit d'entropie totale ne peut pas être infini. La variation de la quantité d'entropie totale générée par rapport au temps  $\frac{\Delta S}{\Delta t}$  doit être une quantité finie. Dans les phénomènes instantanés, comme  $\Delta t$  tend vers zéro ( $\Delta t \rightarrow 0$ ) il est indispensable que la quantité d'entropie totale générée tende vers 0 ( $\Delta S \rightarrow 0$ )

$$\text{Équation II-4} \quad \frac{\Delta S}{\Delta t} = \text{quantité finie, si } \Delta t \rightarrow 0 \text{ alors } \Delta S \rightarrow 0$$

## II.1.2 ETUDE DE CAS

Nous allons à travers l'analyse théorique présentée ci-dessus déterminer l'évolution de la température de différents produits au cours de leur autovaporisation suite à une variation abrupte des conditions thermodynamiques du milieu environnant. Les produits étudiés sont les suivants : une gouttelette d'eau et une gouttelette de tétrafluoroéthane.

### II.1.2.1 Gouttelette d'eau

Les études réalisées, dans la bibliographie, ont montré que l'eau possède des capacités considérables de refroidissement de surface par pulvérisation sous basses pressions



(Aoki, 2000) et que la quantité d'eau évaporée par « Flash Evaporation » était largement supérieure à celle obtenue par évaporation simple (Miyatake, et al., 2001)

En 2001, Rakatozafy a trouvé, lors du séchage par DDS (Déshydratation par Détentes Successives) que la quantité d'eau éliminée lors d'une détente instantanée ( $\Delta t < 200\text{ms}$ ) était deux fois supérieure à celle évaporée lors d'une détente lente ( $\Delta t > 1\text{s}$ ) (Rakatozafy, 2001)

Afin de mieux comprendre ces phénomènes, nous allons utiliser l'analyse théorique proposée par K. Allaf et l'appliquer à une gouttelette d'eau, de rayon « r », qui se trouve en équilibre thermodynamique dans un milieu infini sous une pression initiale  $P_i$  et une température initiale  $T_i$  et qui passe « instantanément » à une pression finale  $P_f$  dont la température d'équilibre est de  $T_e$ .

#### **II.1.2.1.1 Détente Instantanée**

La gouttelette d'eau considérée est de faible rayon de telle sorte que le nombre de Biot soit inférieur à 0,1. La température est ainsi homogène au sein de la gouttelette et indépendante du rayon.

$$\text{Équation II-5} \quad Bi = \frac{2hr}{\lambda}$$

Où

- ✚ h est le coefficient de convection entre la gouttelette et le milieu environnant ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )
- ✚  $\lambda$  est la conductivité thermique de la gouttelette d'eau à la température  $T_i$  ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

La gouttelette subit une détente instantanée vers une pression finale  $P_f$  inférieure à  $P_i$  (température d'équilibre de la goutte à  $P_f$  est égale à  $T_e$ ). La gouttelette d'eau se trouve ainsi dans un état métastable (surchauffée), le surplus d'énergie se transforme en chaleur latente de vaporisation, une partie de l'eau se trouve éliminer par autovaporisation.

Vue la courte durée de l'opération, nous considérons qu'« aucun » échange thermique ne s'effectue avec le milieu extérieur, la gouttelette voit alors sa température chuter considérablement selon le bilan thermique suivant :

$$\begin{array}{c} \text{Équation II-6} \\ \text{Quantité de Chaleur perdue} \\ \langle \text{ par la gouttelette suite} \rangle + \langle \text{Quantité de Chaleur éliminée} \\ \text{à l'autovaporisation} \quad \text{par autovaporisation} \rangle = 0 \end{array}$$

Soit :

$$\text{Équation II-7} \quad m_l \cdot C_v \cdot (T_s - T_i) + m_g L_v = 0$$

Où

- ✚  $m_l$  est la masse de la gouttelette d'eau après autovaporisation (kg)
- ✚  $C_v$  est la capacité calorifique de la gouttelette ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
- ✚  $T_s$  est la température finale atteinte par la gouttelette suite à la détente (K)
- ✚  $m_g$  est la masse d'eau éliminée par autovaporisation (kg)
- ✚  $L_v$  est la chaleur latente de vaporisation ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

En notant « e » la fraction d'eau éliminée par autovaporisation, nous pouvons écrire :

$$\text{Équation II-8} \quad m * (1 - e) * C_v * (T_s - T_i) + m * e * L_v = 0$$

Où

- ✚  $m$  est la masse initiale de la gouttelette (kg)

Cette équation s'écrit également sous la forme suivante :

$$\text{Équation II-9} \quad \frac{(1-e)}{e} = - \frac{L_v}{C_v * (T_s - T_i)}$$

Quand la détente est réalisée d'une façon quasi-statique, nous noterons «  $e_0$  » la fraction d'eau évaporée ; l'Équation II-7 s'écrit alors:

$$\text{Équation II-10} \quad m * (1 - e_0) * C_v * (T_e - T_i) + m * e_0 * L_v = 0$$

Donc :

$$\text{Équation II-11} \quad e_0 = \frac{C_v * (T_e - T_i)}{C_v * (T_e - T_i) - L_v}$$

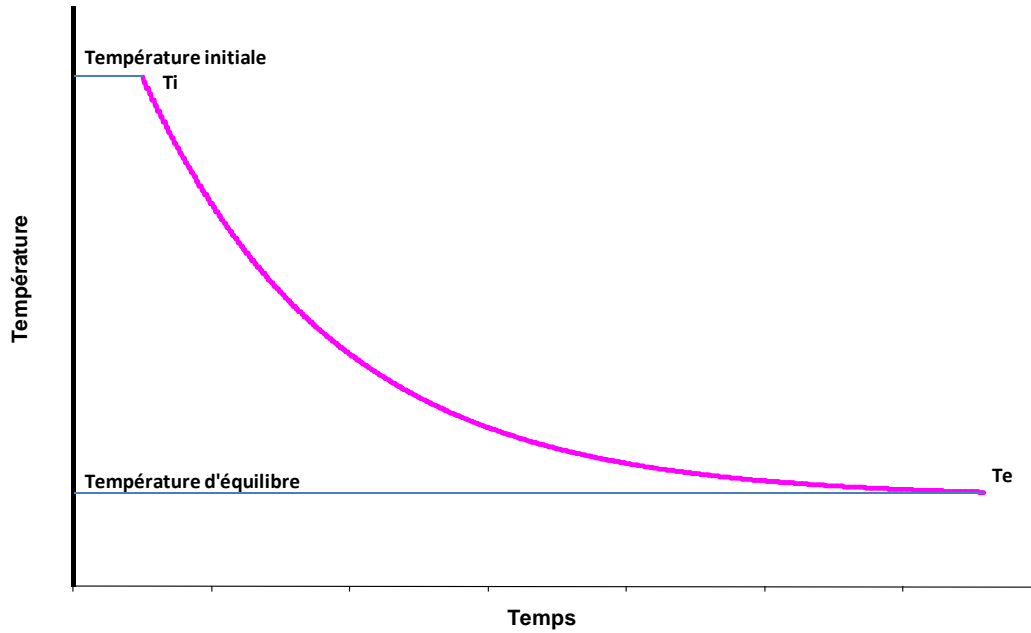


Figure II-3 Variation de la température de la gouttelette d'eau lors d'une détente quasi-statique

Or, lors d'une détente instantanée, et selon la théorie proposée par K. Allaf, le système passe par un état de non équilibre où l'entropie totale générée est nulle. Dans notre cas, nous sommes en présence d'une transformation complexe à deux paramètres : la pression et la température. En appliquant l'analyse théorique des phénomènes instantanés, nous avons que l'équilibre mécanique ( $P = P_f$ ) est atteint en premier, alors que la température s'éloigne de son équilibre pour tenter de s'opposer à cette variation en générant une entropie totale nulle !

$$\text{Équation II-12} \quad \Delta S = \sum_i \Delta S_i \rightarrow 0$$

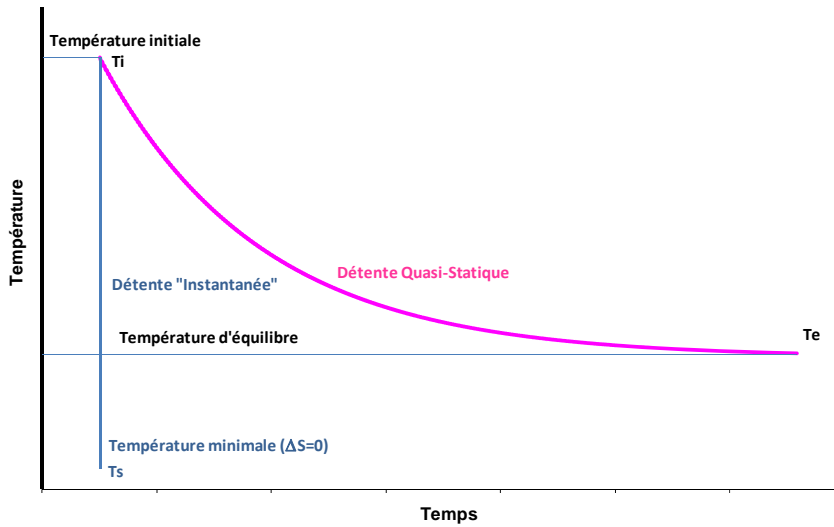


Figure II-4 Variation de la température de la gouttelette lors d'une détente instantanée

Lors de cette détente instantanée, la pression varie abruptement pour passer de sa valeur initiale  $P_i$  vers sa valeur finale  $P_f$ , il s'en suit l'autovaporisation d'une partie de l'eau et par conséquent le refroidissement de la gouttelette.

En considérant un système formé par une gouttelette d'eau, suspendue dans un milieu infini, sous une pression initiale  $P_i$  et une température initiale  $T_i$ , et qui se trouve instantanément sous une pression  $P_f < P_i$ , l'entropie totale générée s'écrit alors :

$$\text{Équation II-13} \quad \Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 \rightarrow 0$$

Où

✚  $\Delta S_1$  est l'entropie générée par l'autovaporisation de l'eau

$$\text{Équation II-14} \quad \Delta S_1 = m * e * \frac{L_v}{T_i}$$

✚  $\Delta S_2$  est l'entropie générée par la chute de pression

$$\text{Équation II-15} \quad \Delta S_2 = -n * R * \ln \left( \frac{P_f}{P_i} \right)$$

Où

- $n$  est le nombre de moles d'eau évaporée

$$\text{Équation II-16} \quad n = \frac{m_g}{M_{eau}} = \frac{m * e}{M_{eau}}$$

○  $M_{\text{eau}}$  est la masse molaire de l'eau soit 0,018 kg/mol

✚  $\Delta S_3$  est l'entropie générée par refroidissement de la gouttelette d'eau

$$\text{Équation II-17} \quad \Delta S_3 = m * (1 - e) * C_v * \ln \left( \frac{T_s}{T_i} \right)$$

L'entropie totale générée prend alors la forme suivante :

$$\text{Équation II-18} \quad \Delta S_{\text{univers}} = \overbrace{m * e * \frac{L}{T_i}}^{\text{Autovaporisation}} - \overbrace{\frac{m * e}{M_{\text{eau}}} * R * \ln \left( \frac{P_f}{P_i} \right)}^{\text{Chute de Pression}} + \overbrace{m * (1 - e) * C_v * \ln \left( \frac{T_s}{T_i} \right)}^{\text{Refroidissement gouttelette}}$$

En combinant l'équation du bilan thermique et l'équation  $\Delta S=0$  nous obtenons :

$$\text{Équation II-19} \quad - \frac{L}{(T_s - T_i)} \ln \left( \frac{T_s}{T_i} \right) + \frac{L_v}{T_i} - \frac{R}{M_{\text{eau}}} \ln \left( \frac{P_f}{P_i} \right) = 0$$

La résolution de cette équation nous permet de déterminer la température minimale atteinte par la goutte en fonction de la pression initiale et de la pression finale.

Tableau II-1 Tableau de variation de  $T_s$  en fonction de  $P_i$  et  $P_f$

$P_i$ (Pa)	$P_f$ (Pa)	$T_i$ (K)	$T_e$ (K)	$e/e_0$	$T_s$ (K)
1,00E+05	5,0E+03	373	306	184%	236
2,00E+05	5,0E+03	393	306	176%	220
3,00E+05	5,0E+03	407	306	171%	211
4,00E+05	5,0E+03	417	306	168%	204
5,00E+05	5,0E+03	425	306	165%	198
6,00E+05	5,0E+03	432	306	163%	194
7,00E+05	5,0E+03	438	306	162%	190
8,00E+05	5,0E+03	443	306	160%	187
9,00E+05	5,0E+03	448	306	159%	184
1,00E+06	5,0E+03	453	306	158%	181
1,00E+05	1,0E+04	373	319	190%	261
2,00E+05	1,0E+04	393	319	181%	244
3,00E+05	1,0E+04	407	319	175%	233
4,00E+05	1,0E+04	417	319	172%	226
5,00E+05	1,0E+04	425	319	169%	220
6,00E+05	1,0E+04	432	319	167%	215

7,00E+05	1,0E+04	438	319	165%	211
8,00E+05	1,0E+04	443	319	164%	208
9,00E+05	1,0E+04	448	319	162%	205
1,00E+06	1,0E+04	453	319	161%	202
1,00E+05	5,0E+04	373	354	205%	333
2,00E+05	5,0E+04	393	354	194%	312
3,00E+05	5,0E+04	407	354	187%	300
4,00E+05	5,0E+04	417	354	183%	291
5,00E+05	5,0E+04	425	354	180%	284
6,00E+05	5,0E+04	432	354	178%	278
7,00E+05	5,0E+04	438	354	176%	274
8,00E+05	5,0E+04	443	354	174%	269
9,00E+05	5,0E+04	448	354	172%	266
1,00E+06	5,0E+04	453	354	171%	262
2,00E+05	1,0E+05	393	373	204%	350
3,00E+05	1,0E+05	407	373	196%	336
4,00E+05	1,0E+05	417	373	191%	327
5,00E+05	1,0E+05	425	373	188%	319
6,00E+05	1,0E+05	432	373	185%	313
7,00E+05	1,0E+05	438	373	182%	308
8,00E+05	1,0E+05	443	373	180%	303
9,00E+05	1,0E+05	448	373	178%	299
1,00E+06	1,0E+05	453	373	176%	295

Les températures initiales et à l'équilibre, la capacité calorifique, la chaleur latente de vaporisation ainsi que la masse volumique de l'eau sont déterminées à partir des tableaux de variation des propriétés thermodynamiques de l'eau en fonction de la pression de saturation (Voir Annexe)

Nous remarquons que selon la variation des conditions initiales et finales, la quantité d'eau évaporée est quasiment 2 fois supérieure à celle obtenue lors d'une détente quasi-statique, ce qui va dans le sens des résultats expérimentaux obtenus par Rakatozafy.

La variation de la température de la gouttelette d'eau en fonction de  $P_i$  et  $P_f$  peut être représentée par le graphique suivant :

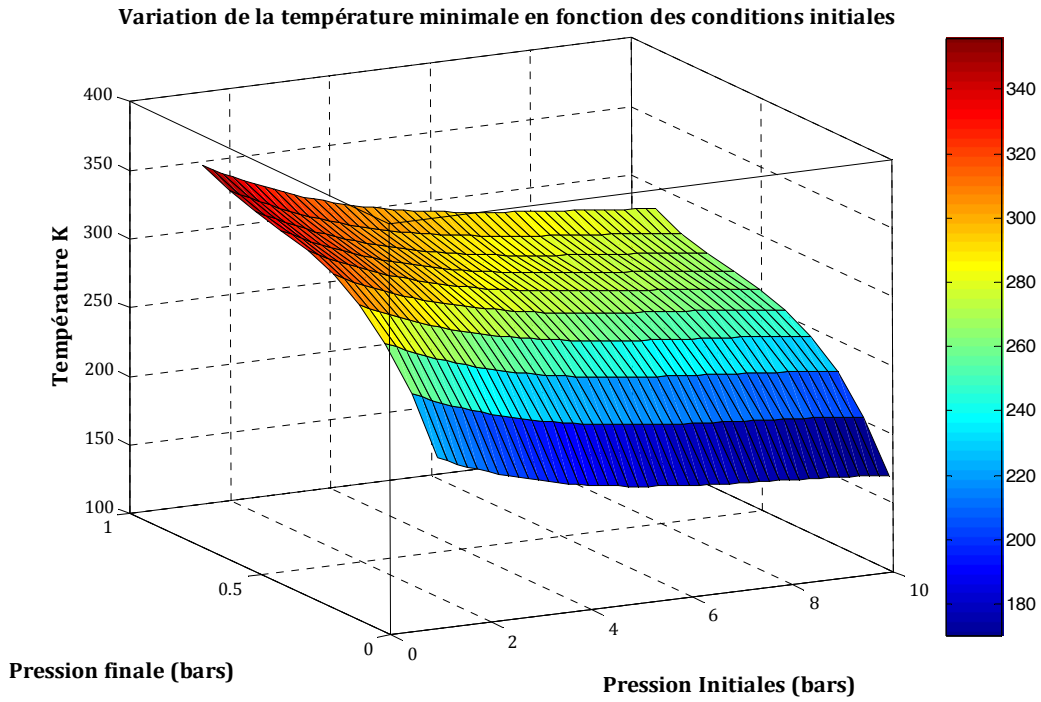


Figure II-5 Variation de la température de la gouttelette d'eau en fonction de la pression initiale et de la pression finale.

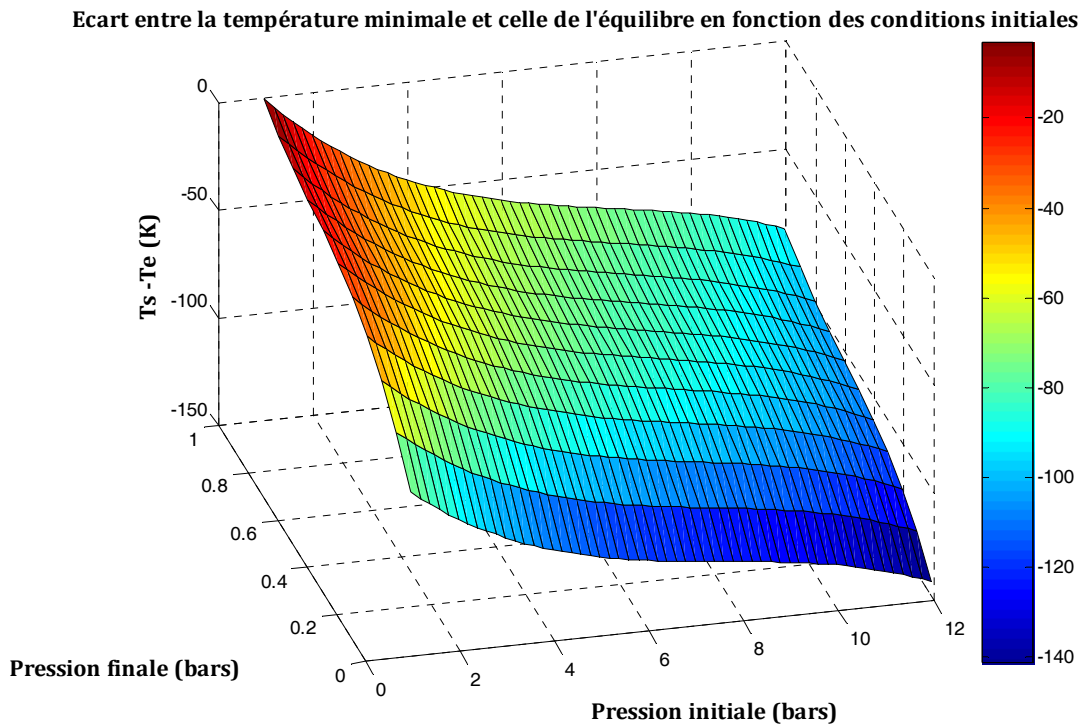


Figure II-6 Variation de l'écart de température ( $T_s - T_e$ ) entre la température minimale atteinte et celle de l'équilibre en fonction des conditions initiales et finales

### II.1.2.2 Remise à la température d'équilibre

Lors de la détente instantanée, la gouttelette d'eau s'éloigne de son équilibre thermique en passant par un état de non équilibre pour lequel l'entropie totale générée est égale à zéro ( $\Delta S=0$ ). La gouttelette atteint ainsi une température minimale avant de se remettre à sa valeur d'équilibre. Dans cette partie nous allons déterminer l'évolution temporelle de la température à partir de sa valeur minimale  $T_s$ . Pour ce faire, nous considérons que la gouttelette est suspendue dans un milieu infini (Pression  $P_f$  et Température  $T_e$ ) et entourée uniquement de vapeur d'eau à la limite de saturation. Vue la différence de température entre la gouttelette et le milieu environnant, la vapeur d'eau vient se condenser sur la gouttelette qui va voir son volume et sa température augmenter en fonction du temps.

Nous allons déterminer dans ce qui suit le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre. Le bilan thermique peut être écrit entre les trois éléments suivants :

La quantité de chaleur échangée par convection entre la surface de la goutte et le milieu environnant

$$\text{Équation II-20} \quad dQ_1 = h * A * (T_e - T)dt$$

Où

✚ h est le coefficient de convection entre la surface de la gouttelette et le milieu environnant ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )

✚ S est la surface d'échange ( $\text{m}^2$ ) :

$$\text{Équation II-21} \quad A = 4\pi * r^2$$

✚ T est la température à la surface de la gouttelette (K)

La quantité de chaleur récupérée par la gouttelette suite à l'élévation de sa température,

$$\text{Équation II-22} \quad dQ_2 = m * c_p * dT$$

Où

m est la masse de la gouttelette de rayon « r » à l'instant « t »



$$\text{Équation II-23} \quad m = \rho_{eau} * \frac{4}{3} \pi * r^3$$

La quantité de chaleur échangée par condensation

$$\text{Équation II-24} \quad dQ_3 = \overbrace{dm * L}^{\text{Condensation}} + \overbrace{dm * c_p * (T_e - T)}^{\text{Refroidissement de l'eau condensée}}$$

Où

✚ dm est la variation de la masse de la gouttelette due à la condensation

$$\text{Équation II-25} \quad dm = 4\pi r^2 \rho_{eau} dr$$

✚ L est la chaleur latente de condensation

Les équations de bilan de chaleur s'écrivent alors :

$$\text{Équation II-26} \quad dm * [c_p * (T_e - T) + L] + m * c_p * dT = 0$$

$$\text{Équation II-27} \quad h * A * (T_e - T) dt + dm * [c_p * (T_e - T) + L] = 0$$

En combinant les équations, Équation II-25, Équation II-26 et Équation II-27 nous obtenons :

$$\text{Équation II-28} \quad \frac{dr}{r} = -\frac{1}{3} \frac{dT}{[c_p * (T_e - T) + L]}$$

En intégrant cette équation, nous déterminons la variation du rayon de la gouttelette en fonction de la température :

$$\text{Équation II-29} \quad r = r_0 * \left[ (T_e - T) + \frac{L}{c} \right]^{\left(\frac{-1}{3}\right)}$$

Avec :

$$\text{Équation II-30} \quad r_0 = r_i * \left[ (T_e - T_i) + \frac{L}{c} \right]^{\left(\frac{1}{3}\right)}$$

Où  $r_i$  est le rayon intermédiaire suite à la gouttelette après la détente instantanée

En dérivant l'Équation II-29 par rapport à la température nous obtenons :

$$\text{Équation II-31} \quad dr = \frac{1}{3} r_0 * \left[ (T_e - T) + \frac{L}{c} \right]^{\left(\frac{-4}{3}\right)} dT$$

En remplaçant cette équation dans l'Équation II-28 nous obtenons

$$\text{Équation II-32} \quad dt = \frac{\rho_{eau} \cdot c_p}{3 \cdot h} r_0 * \frac{[(T_e - T) + \frac{L}{c}]^{(-\frac{1}{3})}}{(T_e - T)} dT$$

En intégrant cette équation pour une variation de température entre  $T_i$  et  $T_e$  nous pouvons déterminer le temps nécessaire pour atteindre la température d'équilibre

$$\text{Équation II-33} \quad \int_0^t dt = \int_{T_i}^{T_e} \frac{\rho_{eau} \cdot c_p}{3 \cdot h} r_0 * \frac{[(T_e - T) + \frac{L}{c}]^{(-\frac{1}{3})}}{(T_e - T)} dT$$

$$\text{Équation II-34} \quad t = \frac{\rho_{eau} \cdot c_p}{3 \cdot h} r_i * [(T_e - T_i) + \frac{L}{c}]^{(\frac{1}{3})} \int_{T_i}^{T_e} \frac{[(T_e - T) + \frac{L}{c}]^{(-\frac{1}{3})}}{(T_e - T)} dT$$

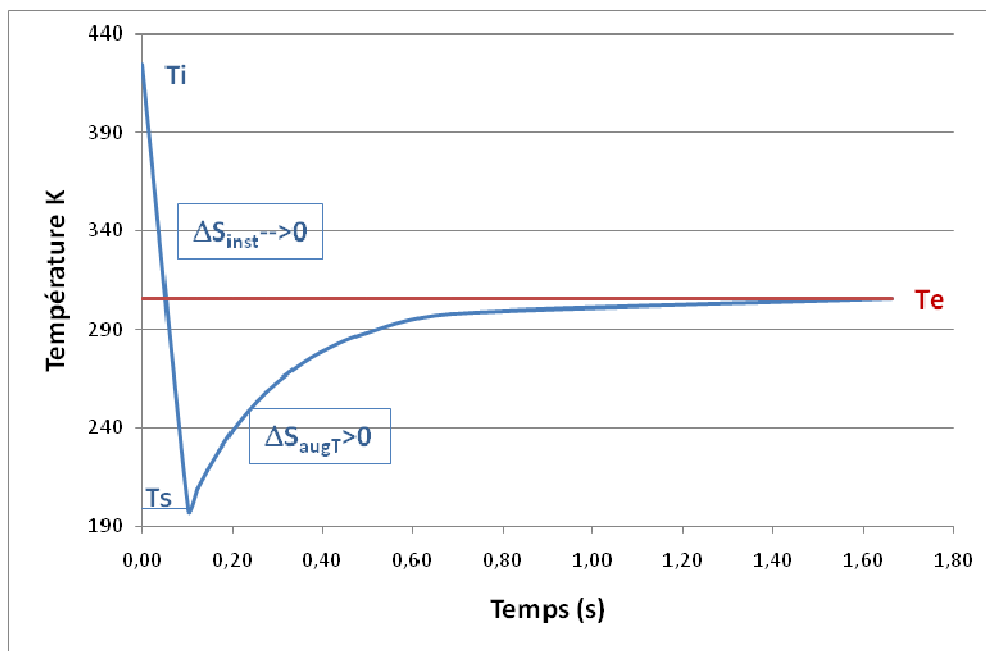


Figure II-7 Variation de la température de la gouttelette d'eau en fonction du temps suite à une détente instantanée (Exemple : Détente instantanée d'une pression initiale de 5 bars (425K) vers une pression finale de 50 mbars (306 K))

Les calculs montrent que le temps nécessaire pour atteindre 99,7% de la température d'équilibre est de l'ordre de la seconde ( $\sim 1$ s) et quasiment le double pour atteindre les 100%. Ainsi lors d'une détente lente (durée de détente  $> 1$ s donc supérieure au temps nécessaire pour atteindre l'équilibre !), le système évolue directement vers son état d'équilibre sans passer par l'étape de non équilibre correspondant à une génération d'entropie totale nulle. C'est la raison pour laquelle la quantité d'eau éliminée est largement inférieure à celle obtenue lors des détentes abruptes !

Ainsi nous pouvons considérer qu'une transformation est abrupte, instantanée, si elle est effectuée pendant une durée inférieure au temps nécessaire à sa remise à l'équilibre. Nous pourrions ainsi appliquer l'analyse théorique de l'instantanéité.

Tableau II-2 Variation du temps nécessaire pour atteindre 99,7% de l'équilibre thermique et l'augmentation du rayon de la gouttelette en fonction de  $T_s$  ( $P_i=500$  kPa,  $T_i= 425K$  ;  $P_f= 5$  kPa,  $T_f= 306$  K)

$\Sigma\Delta S_{inst}$	$\Delta S_{augT}$	$T_s$ (K)	$r_e$ (m)	t(s)
0,00	1,5E-04	198	4,75E-04	1,56
2,1E-05	1,2E-04	208	4,77E-04	0,59
3,9E-05	9,3E-05	218	4,79E-04	0,40
5,5E-05	7,1E-05	228	4,82E-04	0,30
6,9E-05	5,2E-05	238	4,85E-04	0,23
8,0E-05	3,7E-05	248	4,88E-04	0,18
9,0E-05	2,5E-05	258	4,91E-04	0,13
9,7E-05	1,5E-05	268	4,94E-04	0,10
1,0E-04	7,8E-06	278	4,97E-04	0,07
1,1E-04	3,1E-06	288	5,00E-04	0,04
1,1E-04	5,4E-07	298	5,04E-04	0,02
1,1E-04	9,8E-11	306	5,07E-04	0,00

La variation de l'entropie suite à l'augmentation de la température de la gouttelette d'eau est donnée par :

$$\text{Équation II-35} \quad \Delta S_{augT} = -m_l \cdot c_p \int_{T_s}^{T_e} \left( \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T} \right) dT > 0$$

Donc la variation de l'entropie totale de l'univers suite à la transformation (Détente instantanée et remise à la température d'équilibre) sera exprimée par :

$$\text{Équation II-36} \quad \Delta S_{univers} = \Delta S + \Delta S_{augT}$$

Or selon l'analyse théorique de l'instantanéité,  $\Delta S \rightarrow 0$  donc

$$\text{Équation II-37} \quad \Delta S_{univers} = \Delta S_{augT} > 0$$

### II.1.2.3 Validation du modèle

L'entropie est une fonction d'état ; elle ne dépend donc que des états initial et final du système indépendamment du chemin parcouru. Ainsi la variation de l'entropie de l'univers déterminée en considérant une transformation quasi-statique d'un état A vers un état C doit être identique à celle obtenue lors du passage par un état intermédiaire (A→B puis B→C)

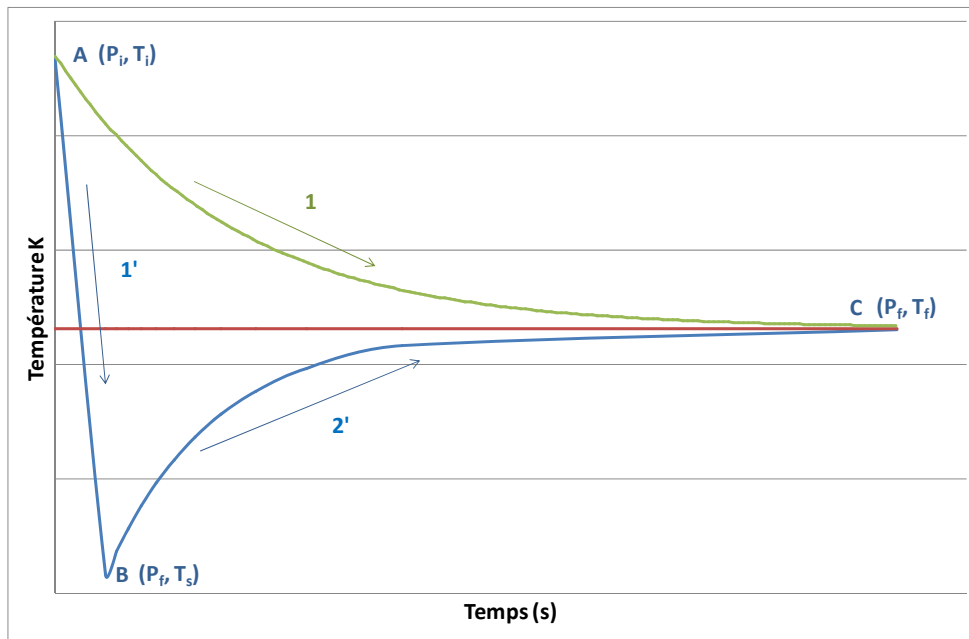


Figure II-8 Le passage d'un système d'un état initial A vers un état final C : Passage direct selon le chemin 1 (transformation quasi-statique) ou indirect en passant par un état intermédiaire B selon les chemins 1' puis 2'.

#### II.1.2.3.1 Transformation quasi-statique (A→C)

En effectuant la transformation selon le chemin 1, nous serons en présence d'un système qui passe d'un état initial A ( $P_i, T_i$ ) vers un état final C ( $P_f, T_f$ ). La variation d'entropie du système peut ainsi être écrite sous la forme suivante :

$$\text{Équation II-38} \quad \Delta S_{univers} = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 = 0$$

Où

✚  $\Delta S_1$  est l'entropie générée par changement de phase de l'eau

$$\text{Équation II-39} \quad \Delta S_1 = m * e_0 * \frac{L_v}{T_i}$$

✚  $\Delta S_2$  est la variation d'entropie générée par la chute de pression

$$\text{Équation II-40} \quad \Delta S_2 = -n * R * \ln \left( \frac{P_f}{P_i} \right)$$

○ Avec n le nombre de moles d'eau évaporée

$$\text{Équation II-41} \quad n = \frac{m_g}{M_{eau}},$$

○  $M_{eau}$  est la masse molaire de l'eau soit 0,018 kg/mol

✚  $\Delta S_3$  est l'entropie générée par refroidissement de la gouttelette d'eau

$$\text{Équation II-42} \quad \Delta S_3 = m * (1 - e_0) * C_v * \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right)$$

L'entropie totale générée prend alors la forme suivante :

$$\text{Équation II-43} \quad \Delta S_{univers} = \overbrace{m * e_0 * \frac{L}{T_i}}^{\text{Evaporation}} - \overbrace{\frac{m * e_0}{M_{eau}} * R * \ln \left( \frac{P_f}{P_i} \right)}^{\text{Variation de pression}} + \overbrace{m * (1 - e_0) * C_v * \ln \left( \frac{T_f}{T_i} \right)}^{\text{Refroidissement de la gouttelette}}$$

### II.1.2.3.2 Transformation instantanée (A→B puis B→C)

Lors d'une détente instantanée, le système passe par un état intermédiaire de non équilibre (A→B) qui correspond à une génération d'entropie totale nulle. Le système passe d'un état initial ( $P_i, T_i$ ) vers un état intermédiaire ( $P_f, T_s$ ) avant d'atteindre son état final ( $P_f, T_f$ ). Ainsi la variation d'entropie de l'univers peut être écrite sous la forme :

$$\text{Équation II-44} \quad \Delta S_{univers} = \Delta S_{A \rightarrow B} + \Delta S_{B \rightarrow C}$$

Or selon l'analyse fondamentale des phénomènes instantanés  $\Delta S_{A \rightarrow B} \rightarrow 0$ , donc

$$\text{Équation II-45} \quad \Delta S_{univers} \cong \Delta S_{B \rightarrow C}$$

La variation de l'entropie de l'univers correspond alors à la variation de l'entropie due à l'augmentation de la température de la gouttelette d'eau  $\Delta S_{augT}$  lors de son passage de B→C.

$$\text{Équation II-46} \quad \Delta S_{univers} \cong \Delta S_{augT} = -m_l \cdot c_p \int_{T_s}^{T_e} \left( \frac{1}{T_i} - \frac{1}{T} \right) dT$$

Où  $m_l$  est la masse de la gouttelette après l'évaporation de la fraction "e"

$$\text{Équation II-47} \quad \Delta S_{univers} \cong -m \cdot (1 - e) \cdot c_p \cdot \left[ \frac{T_e - T_s}{T_e} - \ln \left( \frac{T_e}{T_s} \right) \right]$$

Le calcul réalisé à partir du modèle ainsi défini montre que la variation de l'entropie de l'univers, déterminée lors d'une détente instantanée est identique à celle obtenue lors d'une détente quasi-statique.

A titre d'exemple, lors du passage du système formé par la gouttelette d'eau d'un état initial ( $P_i= 500$  kPa,  $T_i= 425$ K) à un état final ( $P_f=50$  kPa,  $T_f= 306$  K) l'entropie de l'univers est égale à  $1,09 \cdot 10^{-4}$  J/K pour une transformation instantanée et à  $1,08 \cdot 10^{-4}$  J/K pour une transformation quasi-statique, soit un écart de 1%. Ces résultats nous ont permis de valider le modèle proposé.

#### **II.1.2.4 Gouttelette de tétrafluoroéthane (R134a)**

Le refroidissement par cryogène spray est un procédé généralement utilisé pour le refroidissement de la peau lors du traitement laser. Aguilar et al. ont remarqué lors de la pulvérisation du R-134a (Pression initiale de  $P_i= 600$  kPa et température initiale  $T_i= 25^\circ\text{C}$  ; Pression finale  $P_f=100$  kPa et température d'équilibre à  $P_f$  est de  $-26,2^\circ\text{C}$ ) que la température du liquide cryogénique atteignait  $-58^\circ\text{C}$  à 6 mm de la buse (Aguilar, et al., 2001)! Et que la capacité de refroidissement de la peau est d'autant plus importante lorsque la distance entre la buse de pulvérisation et la surface est réduite.

##### **II.1.2.4.1 Explication par la théorie de l'instantanéité**

Nous sommes en présence d'une transformation complexe à plusieurs paramètres. Comme nous le savons, la quantité de vapeur du tétrafluoroéthane (R134-a), générée par autovaporisation, dépend de la température initiale du produit ( $25^\circ\text{C}$ ), de la pression finale et également de la vitesse de détente donc de la distance de la buse par rapport à la surface.

Lors de la pulvérisation, le système passe par un état intermédiaire de non-équilibre. Il se trouve en déséquilibre complexe. Il atteint, en premier lieu, son équilibre mécanique ( $P_i=600$  kPa  $\rightarrow$   $P_f=100$  kPa, entropie totale générée positive ( $\Delta S_p > 0$ )); puis son équilibre de phase, la température s'oppose ainsi à cette variation en s'éloignant de son équilibre ( $T_{\min} = -58^\circ\text{C} \ll T_{\text{eq}} = -26^\circ\text{C}$ ) (Génération d'une entropie totale négative ( $\Delta S_T < 0$ )) de telle sorte que !  $\Delta S_p + \Delta S_T \rightarrow 0$

En utilisant l'équation I-29 exprimant la variation de la température des produits en fonction des conditions initiales et finales ( $P_i=600$  kPa,  $T_i=25^\circ\text{C}$  ;  $P_f=100$  kPa,  $T_e=-26^\circ\text{C}$  ; pour les propriétés thermodynamiques du R134-a voir Annexe) nous obtenons, une température minimale du produit à sa sortie de la buse de pulvérisation de  $\sim -75^\circ\text{C}$  ! La valeur obtenue en résolvant l'équation  $\Delta S=0$  explique l'éloignement de la température du liquide cryogénique de sa valeur d'équilibre.

N'oublions pas que c'est une approche asymptotique ( $\Delta S \rightarrow 0$ ) ! Ce qui explique la différence entre la valeur expérimentale et la valeur théorique !

D'autres processus, tels que la capacité importante d'évacuation de chaleur par unité de masse de réfrigérant pendant le refroidissement des surfaces par pulvérisation de l'eau sous vide (I. AOKI) ainsi que le taux élevé de transfert de masse par autovaporisation suite à une détente abrupte (Peterson et al.), 10 à 12 fois supérieur à celui obtenu par une simple évaporation peuvent être également interprétés de la même façon. En effet lors de ces processus, le système est en état intermédiaire de non-équilibre, la température s'oppose à la variation de la pression en s'éloignant de l'équilibre thermodynamique ( $T < T_{eq}$ ), le degré de surchauffe se trouve plus élevé augmentant par conséquent les transferts de masse et les capacités d'évacuation de chaleur.

La température minimale (loin de l'équilibre) peut être déterminée à travers l'approche asymptotique en calculant la variation de l'entropie totale générée  $\Delta S_p + \Delta S_T \rightarrow 0$

### **II.1.2.5 BLEVE et LOCA**

Le BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) est un phénomène physique qui peut affecter presque tout liquide contenu dans un réservoir fermé ayant une température considérablement supérieure à celle de son ébullition à pression atmosphérique. Une chute abrupte de la pression due, par exemple, à la rupture de la structure du réservoir, conduirait à une explosion. Le LOCA (Loss of Coolant Accidents) quant à lui, il désigne la génération d'importantes quantités de vapeur lors de la rupture des conduites de refroidissement sous pression dans les centrales nucléaires.

### II.1.2.5.1 Explication par la théorie de l'instantanéité

Au cours de ces deux phénomènes, la chute abrupte de pression, implique, au cours de l'évolution du système vers l'équilibre, le passage par un état intermédiaire de non-équilibre. En premier, l'équilibre mécanique est atteint (pression), la température s'opposant à cette variation s'éloigne de son équilibre et atteint des valeurs largement inférieures à celles de l'équilibre, augmentant d'une façon considérable les quantités de vapeur générée. (Entropie totale générée nulle  $\Delta S_{p+} + \Delta S_T \rightarrow 0$ )

$$\text{Équation II-48} \quad \frac{e}{e_0} = \frac{(T_s - T_i)}{(T_e - T_i)} * \frac{C_v * (T_e - T_i) - L_v}{C_v * (T_s - T_i) - L_v}$$

La fraction de liquide éliminée par autovaporisation est d'autant plus importante lorsque la différence de température  $T_s - T_e$  est plus importante.

Ne pouvant plus contenir la quantité de vapeur générée (pression trop élevée), le réservoir explose. Cette explosion (rupture instantanée) accompagnée d'une génération d'entropie totale positive doit, selon la théorie de l'instantanéité, être couplée à un phénomène d'entropie négative. Ce dernier pourrait être l'émission d'une onde sonore. (Entropie totale générée nulle  $\Delta S_{pe+} + \Delta S_s \rightarrow 0$ )

Avec

- ✚  $\Delta S_{pe}$  l'entropie totale générée par la variation abrupte de la pression lors de l'explosion
- ✚  $\Delta S_s$  l'entropie totale générée par l'émission de l'onde sonore.

## II.1.3 LES FONDEMENTS DE LA THERMODYNAMIQUE DE L'INSTANTANEITE

L'analyse thermodynamique des phénomènes « instantanés » (transformations instantanées irréversibles) montre que l'évolution du système vers l'état d'équilibre où la transformation génère une entropie totale, du système et du milieu extérieur, positive (2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique) implique un passage obligatoire par un état intermédiaire de non-équilibre.



Ce passage est caractérisé par une génération d'une entropie totale nulle. En effet, l'entropie totale ne peut nullement avoir une génération infinie. Donc pour une transformation instantanée où  $\Delta T \rightarrow 0$ , nous avons  $\Delta S \rightarrow 0$ .

*Équation II-49*      $\frac{\Delta S_{totale}}{\Delta t}$  *est une quantité finie!*

Les transformations instantanées sont caractérisées par la présence d'une hiérarchie des divers équilibres (mécanique, phasique, thermique...).

A partir de l'analyse théorique de l'instantanéité, l'étude fondamentale et l'interprétation des phénomènes instantanés de la littérature nous pouvons établir « les fondements de la thermodynamique de l'instantanéité » :

**Fondements de la thermodynamique de l'instantanéité :**

- *Une transformation complexe (plusieurs paramètres) réalisée instantanément génère une entropie totale nulle.*
- *Les différents paramètres thermodynamiques possèdent différentes priorités vis-à-vis de la recherche de l'équilibre.*
- *Une transformation simple (un seul paramètre) ne peut pas être réalisée instantanément.*

## Chapitre II.2

### LE SECHAGE : APPROCHE FONDAMENTALE

Pour remédier aux problématiques de séchage présentées dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, une approche fondamentale nouvelle nous a parus nécessaire. Elle sera présentée et détaillée dans ce chapitre. Cette approche nous permettra de définir des procédés d'intensification du processus de séchage.

#### II.2.1 APPROCHE FONDAMENTALE

Nous savons que le séchage des fruits et légumes en morceaux est contrôlé par le gradient de pression partielle de vapeur d'eau entre la surface du produit et le milieu environnant.

$$\text{Équation II-50} \quad \Delta p = p_s - p_a$$

Où

- ✚  $p_s$  est la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit,
- ✚  $p_a$  est la pression partielle de vapeur d'eau du milieu environnant,
- ✚  $\Delta p$  constitue ainsi l'élément moteur du séchage.

Au cours du séchage, l'eau se déplace de l'intérieur du produit vers sa surface pour s'évaporer dans l'air. Ces deux phénomènes sont régis par la différence de pression partielle de vapeur d'eau  $\Delta p$ . Le changement de phase (liquide- vapeur) nécessite une certaine quantité de chaleur apportée par une source extérieure afin de maintenir / augmenter la température du produit. En effet, en l'absence de cette source, le produit verra sa température chuter suite à « l'autovaporisation » de l'eau ; la chaleur est récupérée ainsi au sein même du produit. La baisse de température induit alors une baisse de la pression partielle de vapeur d'eau générée à la surface du produit.

### **II.2.1.1 Les phénomènes de transfert**

Les phénomènes de transfert mis en jeu au cours du processus de séchage peuvent être répartis en deux catégories : les transferts externes et les transferts internes.

Les transferts externes concernent les échanges de chaleur et de masse entre la surface du produit et le milieu environnant alors que les transferts internes concernent les échanges de chaleur et de matière entre la surface et le cœur du produit. Ces phénomènes de transfert interviennent en série, l'opération est donc contrôlée par le processus à plus faible vitesse. Dans le cas de séchage des fruits et légumes en morceaux par entraînement, c'est le transfert interne de matière qui est le processus limitant !

En plus des phénomènes de transfert, nous pouvons noter l'influence du phénomène de retrait et de la modification physico- chimique des produits (dégradation thermique,...) sur l'opération du séchage ainsi que sur la qualité du produit final.

#### **II.2.1.1.1 Transfert interne de matière**

Lors du séchage, l'eau est transférée à la surface du produit sous forme liquide (eau libre) et/ou sous forme vapeur (eau libre et eau liée). Lorsque l'eau est présente en quantité suffisante dans le produit, elle diffuse de l'intérieur vers la surface sous l'effet du gradient de concentration. Pour des faibles teneurs en eau, ce sont les forces capillaires qui assurent le transfert. Alors que l'eau liquide présente sous forme d'ilots discontinus ainsi que l'eau liée après sa désorption, diffusent sous l'effet du gradient de pression partielle de vapeur d'eau.

Le phénomène de retrait accompagnant l'élimination d'eau du produit lors de la première phase de séchage a un impact très important sur les phénomènes de transfert. En effet, les pores et les alvéoles des produits se retrouvent réduits ralentissant ainsi le transfert par gradient de pression partielle de vapeur.

Le transfert d'eau sous forme liquide est régi par la première loi de Fick. Nous adoptons la formulation générale qui a l'avantage de pouvoir insérer les mouvements (les mouvements de la matrice solide dus au phénomène de retrait par exemple) et l'évolution possible des deux corps (ALLAF, 1982)

$$\text{Équation II-51} \quad \frac{\rho_a}{\rho_b} (\vec{v}_a - \vec{v}_b) = -D_{a,b} \overrightarrow{\text{grad}} \left( \frac{\rho_a}{\rho_b} \right)$$

Où :

- ✚  $\rho_a$  : Masse par unité de volume du corps a (en kg.m<sup>-3</sup>)
- ✚  $\rho_b$  : Masse par unité de volume du corps b (en kg.m<sup>-3</sup>)
- ✚  $v_a$  : Vitesse moyenne absolue du premier corps (en m.s<sup>-1</sup>)
- ✚  $v_b$  : Vitesse moyenne absolue du deuxième corps (en m.s<sup>-1</sup>)
- ✚  $D_{a,b}$  : Coefficient de diffusion ou diffusivité de a dans b (en m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>)

Dans le cas d'une matrice solide supposée immobile, la deuxième loi de Fick peut s'écrire :

$$\text{Équation II-52} \quad \frac{\partial w}{\partial t} = -D \nabla^2 w$$

Où

w : est la teneur en eau du produit (kg eau/ kg matière sèche)

$$\text{Équation II-53} \quad w = \frac{\rho_a}{\rho_b}$$

Nous pouvons ainsi réaliser une modélisation empirique de l'ensemble du processus de transfert d'eau au sein du produit, en tant que phase liquide continue, en remplaçant la diffusivité D par une diffusivité effective D<sub>eff</sub> et les solutions proposées par Crank, selon la géométrie considérée, peuvent être alors adoptées. Trois cas se présentent, la diffusion en géométries cylindrique, sphérique et plane (Crank, 1975).

Dans le cas d'une géométrie sphérique, la solution de Crank peut être représentée par l'équation suivante :

$$\text{Équation II-54} \quad \frac{H(r) - H_{eq}}{H_{init} - H_{eq}} = \frac{2R}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin\left(\frac{n\pi r}{R}\right) e^{\left(\frac{-D_{eff} n^2 \pi^2 t}{R^2}\right)}$$

- ✚ H<sub>init</sub> est la teneur en eau initiale du produit
- ✚ H<sub>eq</sub> est la teneur en eau à l'équilibre
- ✚ H est la teneur en eau à l'instant t

L'intégration de cette équation permet d'aborder l'évolution dans le temps de la teneur moyenne du produit, supposée uniforme au début et à la fin de l'opération :

$$\text{Équation II-55} \quad \frac{\tilde{H}-H_{eq}}{H_{init}-H_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{\left(\frac{-D_{eff} n^2 \pi^2 t}{R_c^2}\right)} \sum \frac{1}{n^2}$$

Où

✚ R<sub>c</sub> est le rayon de la sphère

Au cours de ce travail, nous avons opté pour la réduction de cette équation en considérant des temps relativement importants :

$$\text{Équation II-56} \quad \frac{\tilde{H}-H_{eq}}{H_{init}-H_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} e^{\left(\frac{-D_{eff} n^2 \pi^2 t}{R_c^2}\right)}$$

Pour une géométrie cylindrique, la solution de Crank est exprimée sous la forme suivante :

$$\text{Équation II-57} \quad \frac{\tilde{H}-H_{eq}}{H_{init}-H_{eq}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\beta_n^2} e^{\left(-\beta_n^2 \frac{D_{eff} t}{R_c^2}\right)}$$

Où

✚ R est le rayon du cylindre

✚ et β<sub>n</sub> sont les racines de la fonction de Bessel

En considérant des temps assez longs, nous pouvons nous limiter au premier terme et l'équation simplifiée que nous avons adoptée est la suivante :

$$\text{Équation II-58} \quad \ln\left(\frac{\tilde{H}-H_{eq}}{H_{init}-H_{eq}}\right) = -5,783 \frac{D_{eff} t}{R_c^2} \quad (\text{Waananen, et al., 1996})$$

Dans le cas d'une géométrie plane, nous avons simplifié la solution de Crank en nous limitant au premier terme ; l'équation utilisée est la suivante :

$$\text{Équation II-59} \quad \frac{H(r)-H_{eq}}{H_{init}-H_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} e^{\left(\frac{-D_{eff} \pi^2 t}{l^2}\right)} + \dots$$

Où

✚ l est la demi-épaisseur de la surface plane

Notons enfin que la diffusivité effective dépend également de la température selon la relation d'Arrhénius :

$$\text{Équation II-60} \quad D_{eff} = Ae^{\left(-\frac{E_a}{RT}\right)}$$

### II.2.1.1.2 Transfert interne de chaleur

Lors du séchage, une source extérieure fournit de la chaleur au produit par convection, par contact ou par rayonnement. Cette chaleur est transférée à la matière pour évaporer l'eau. La diffusion de la chaleur à l'intérieur du produit est contrôlée par le gradient de température entre la surface et le cœur du produit. Notons que les micro-ondes peuvent chauffer le produit en volume. Le transfert de chaleur s'effectue selon la loi de Fourier :

$$\text{Équation II-61} \quad \rho_p c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_p \nabla T) + Q$$

Où

- ✚ T est la température (K)
- ✚  $c_p$  est la chaleur massique ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
- ✚  $\lambda_p$  est la conductivité thermique globale du produit ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
- ✚  $\rho_p$  est la masse volumique spécifique du produit ( $kg.m^{-3}$ ).
- ✚ Q est la quantité de chaleur fournie en volume ( $W.m^{-3}$ )

Il est important de noter que la conductivité thermique  $\lambda$  dépend de la teneur en eau du produit, de sa structure et donc de sa porosité (taux d'expansion). La diminution de la teneur en eau du produit au cours du séchage induit une diminution de la conductivité thermique qui va se compenser par le phénomène de retrait

En effet, en négligeant la conductivité de l'air, la conductivité thermique du produit peut s'écrire sous la forme :

$$\text{Équation II-62} \quad \lambda_p = \lambda_m \frac{V_m}{V} + \lambda_{eau} \frac{V_{eau}}{V}$$

Où

- ✚  $\lambda_m$  est la conductivité thermique de la matière proprement dite ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
- ✚  $\lambda_{eau}$  est la conductivité thermique de l'eau ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )

- ✚  $V_m$  est le volume de la matière proprement dite
- ✚  $V_{eau}$  est le volume de l'eau dans le produit
- ✚  $V$  est le volume du produit

Au fur et à mesure que le séchage avance, la quantité d'eau diminue alors  $\frac{V_{eau}}{V} \rightarrow 0$  et l'Équation II-62 s'écrit alors :

$$\text{Équation II-63} \quad \lambda_p = \lambda_m \frac{V_m}{V}$$

Le phénomène de retrait fait que le produit devient de plus en plus compact et le volume de la matière  $V_m \rightarrow V$  et par la conséquent  $\lambda_p \rightarrow \lambda_m > \lambda_p$

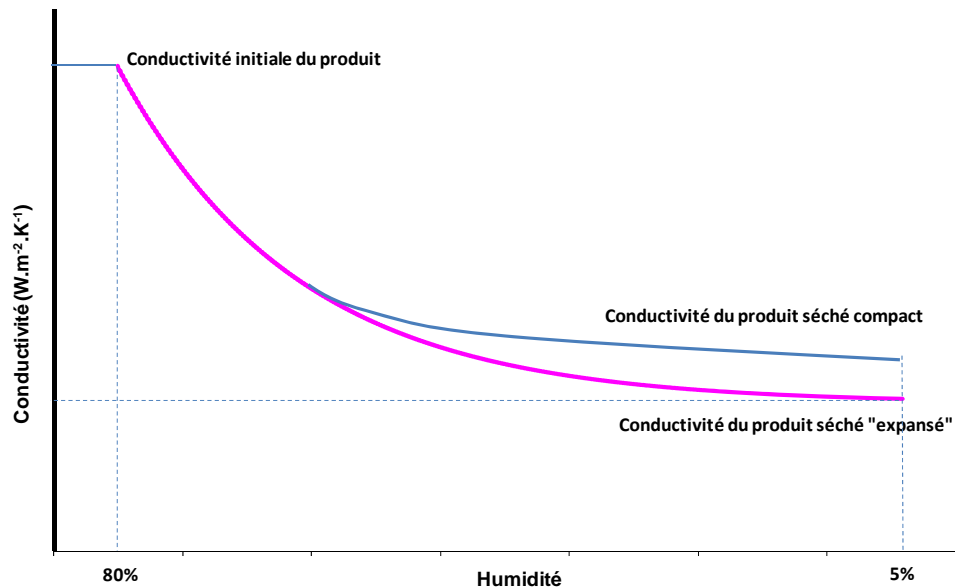


Figure II-9 Variation de la conductivité thermique des produits biologiques au cours du séchage

### II.2.1.2 Première intensification : L'Expansion

La deuxième étape de séchage est gouvernée par la différence de pression partielle de vapeur d'eau au sein de la matière. Le transfert d'eau dépend alors de la surface spécifique du produit et par conséquent de la porosité. Le phénomène de retrait, compactage, observé lors du séchage des fruits et légumes en morceaux par air chaud réduit d'une façon considérable la cinétique de séchage. Pour remédier à ce phénomène,

il serait intéressant d'expanser le produit, ce sera la « première intensification » du séchage. Cette intensification aura pour conséquence l'amélioration de la cinétique de séchage par amélioration du transfert interne de matière.

#### **II.2.1.2.1.1 Expansion par détente instantanée contrôlée DIC**

L'expansion des produits par la technologie DIC, développée au laboratoire LMTAI, semble être une solution adaptée à ce problème. En effet, la détente instantanée contrôlée en tant que traitement de type HTST permet l'expansion des produits tout en assurant une débactérisation systématique avec une dégradation thermique négligeable due au refroidissement instantané.

La première intensification par expansion semble être un moyen très efficace pour réduire les temps de séchage (économie d'énergie) et obtenir des produits de très haute qualité au niveau texturale et organoleptique. Dans ce qui suit nous allons essayer de présenter une approche fondamentale des phénomènes se déroulant lors du séchage après DIC et proposer un procédé de deuxième intensification.

### **II.2.2 CARACTERISATION PHYSIQUE ET THERMIQUE**

Suite au traitement DIC, les propriétés physiques et thermiques des produits se trouvent modifier. En effet, la masse volumique du produit diminue suite à l'expansion.

En utilisant une approximation linéaire la masse volumique du produit peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\text{Équation II-64} \quad \rho_e = \frac{\rho_p}{\varepsilon}$$

Où

✚  $\rho_e$  est la masse volumique du produit expansé ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

✚  $\rho_p$  est la masse volumique spécifique du produit ( $\text{kg.m}^{-3}$ )

✚  $\varepsilon$  est le taux d'expansion relative

La conductivité thermique du produit aussi va diminuer en fonction du taux d'expansion. En utilisant une approximation linéaire nous pouvons écrire :



$$\text{Équation II-65} \quad \lambda_e = \frac{\lambda_p}{\varepsilon}$$

Où

✚  $\lambda_e$  est la conductivité thermique du produit expansé ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

✚  $\lambda_p$  est la conductivité thermique du produit non expansé ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )

L'expansion des fruits et légumes en morceaux conduit alors à l'augmentation de la surface spécifique donc de la porosité des produits mais réduit en même temps la conductivité thermique. Ainsi le processus de séchage se trouve limiter par le transfert interne de chaleur.

### II.2.3 LE PARADOXE

Lorsque l'eau se trouve sous forme d'îlots (phase discontinue), la totalité du corps atteint le niveau hygroscopique ; la migration de l'eau a lieu sous forme vapeur. C'est la discontinuité de la phase liquide dans le produit et la continuité de la phase vapeur dans les pores qui mènent à ce que le transfert se fasse uniquement sous forme vapeur. C'est le gradient de pression partielle de vapeur d'eau qui contrôle le processus de séchage. Pour que la déshydratation continue, il faut que la pression partielle de vapeur d'eau à l'intérieur du produit  $p_{vi}$  soit supérieure à celle à sa surface  $p_{vs}$  :

$$\text{Équation II-66} \quad p_{vi} > p_{vs}$$

La quantité de chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau est alors transférée sous l'effet d'un gradient de température entre la surface et l'intérieur du produit. Pour que le séchage se poursuive, il faut que :

$$\text{Équation II-67} \quad T_i < T_s$$

Où

✚  $T_s$  est la température à la surface du produit

✚  $T_i$  est la température à l'intérieur du produit

Cette situation antonymique ( $T_s > T_i$  et  $p_{vi} > p_{vs}$ ) a été qualifiée d'état paradoxal où la cinétique de séchage se trouve relativement faible (Al-Haddad, et al., 2007).

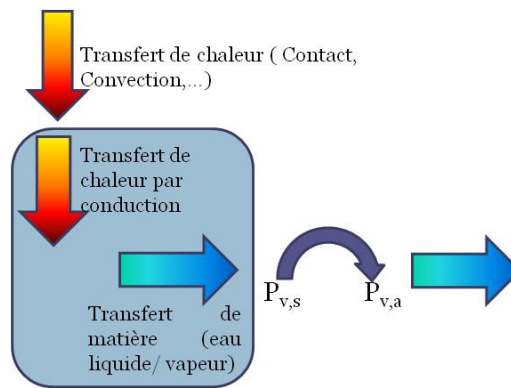


Figure II-10 Schéma des transferts lors du séchage

Lors de cette phase, le transfert de chaleur intervient dans différents points du volume du produit. Le transfert de chaleur peut être écrit alors sous la forme :

$$\text{Équation II-68} \quad \rho_p c_p \frac{\partial T}{\partial t} - (D \overrightarrow{\text{grad}} p_v) A \cdot L = \text{div}(-\lambda_p \overrightarrow{\text{grad}} T) + Q$$

Où

- ✚  $p_v$  est la pression partielle de vapeur d'eau au sein du produit (Pa)
- ✚  $A$  est la surface d'échange du produit ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )
- ✚  $L$  est la chaleur latente de vaporisation ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )
- ✚  $D$  est la diffusivité de la vapeur à l'intérieur du produit ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
- ✚  $c_p$  est la capacité calorifique du produit ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
- ✚  $\lambda_p$  est la conductivité du produit ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
- ✚  $T$  est la température (K)
- ✚  $\rho_p$  est la masse volumique spécifique du produit ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
- ✚  $Q$  est la quantité de chaleur fournie au sein même du produit ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ )

#### II.2.4 DEUXIEME INTENSIFICATION : REMEDIER A L'ETAPE PARADOXALE

Le paradoxe présenté ci-dessus intervient d'une façon accentuée lors du séchage des produits expansés par DIC et cela à cause de la diminution de la conductivité thermique qui rend le transfert interne de chaleur comme facteur limitant et qui augmente par conséquent le degré d'opposition entre le gradient de pression et le gradient de

température. Deux intensifications supplémentaires pourraient être envisagées pour remédier à ce paradoxe : La déshydratation par détentes successives et les micro-ondes.

### **II.2.4.1 Séchage par DDS**

La Déshydratation par Détentes Successives DDS, développée au laboratoire LMTAI, a pour élément moteur le gradient de pression totale entre le cœur et la surface du produit. Dans cette partie de l'étude, nous analyserons la possibilité d'utilisation de la DDS pour remédier à l'étape paradoxale.

#### **II.2.4.1.1 Approche fondamentale et modélisation de la DDS**

La Déshydratation par Détentes Successives DDS se caractérise par l'autovaporisation d'une partie de l'eau du produit lors de la détente, d'un niveau de pression haut vers un niveau bas. On parle d'autovaporisation puisque l'opération ne sollicite que l'énergie thermique propre du produit accumulée au cours de l'étape antérieure à la détente ; en effet, le temps de détente (instantanée) ne permet « aucun » échange significatif de la chaleur avec l'extérieur.

##### ***II.2.4.1.1.1 Analyse de l'opération***

Nous pouvons généralement considérer trois processus intervenant successivement au cours des trois principales étapes de chacun des cycles de l'opération :

1. Lors de l'étape de mise sous pression d'air (pression haute  $P_h$ ), le transfert de chaleur de l'air vers la surface du produit, par convection puis nécessairement de la surface vers le cœur, par conduction n'est pas accompagné de déshydratation. Ce transfert de chaleur se distingue ainsi de l'opération obtenue lors du séchage par air chaud. La température du produit évolue ainsi asymptotiquement vers la température ambiante de l'air.
2. La détente instantanée est accompagnée de la génération, par autovaporisation, d'une certaine quantité de vapeur d'eau en vue de rétablir la pression partielle de vapeur à la température de la surface considérée. La température de l'ensemble du produit baisse « instantanément ».

3. Lors de l'étape de pression haute  $P_h$  et de pression basse  $P_b$ , l'observation a prouvé que la quantité d'eau évaporée reste relativement négligeable.

Le transfert de l'eau au sein du produit vise l'homogénéisation de son humidité. Intervenant principalement au cours de la première phase de pression haute  $P_h$ . Ce transfert est nettement plus faible, voire négligeable, lors de l'étape de pression basse  $P_b$ , du fait du niveau de température relativement bas du produit.

#### **II.2.4.1.1.2 Approche de modélisation**

La DDS se distingue par des processus de transfert de chaleur et de matière séparés, quasiment successifs. Le passage (instantané) de la pression totale, du milieu environnant, d'une valeur haute  $P_h$  à une valeur basse  $P_b$  induit un impact similaire au niveau de la pression partielle de vapeur d'eau. On définit  $\nu$  le coefficient du rapport de détente :

$$\text{Équation II-69} \quad \nu = \frac{P_{haute}}{P_{basse}}$$

La quantité de vapeur éliminée par cycle est proportionnelle à la quantité d'eau nécessaire pour amener la pression de vapeur au voisinage intime de la surface à sa valeur d'équilibre à la température considérée. En admettant l'hypothèse qu'une détente instantanée agit sur la pression partielle de vapeur d'eau à travers le même facteur, la quantité d'eau éliminée par DDS dépend du rapport des pressions totales initiale et finale :

$$\text{Équation II-70} \quad \Delta H = -p_w \left(1 - \frac{1}{\nu}\right). A. F$$

Où F est le facteur de forme (m/J)

Sachant que  $p_w = a_w p_0$  nous pouvons écrire :

$$\text{Équation II-71} \quad \Delta H = -a_w p_0 \left(1 - \frac{1}{\nu}\right). A. F$$

Comme nous l'avons indiqué précédemment dans l'étude fondamentale de l'autovaporisation, la durée de l'opération ne permet « aucun » échange significatif de chaleur avec le milieu extérieur, c'est par autovaporisation que le produit fournit, lors de la détente, de la vapeur. La quantité de vapeur ainsi générée, juste au voisinage de la

surface d'échange, garantit la pression partielle de vapeur d'eau imposée par la température propre de cette surface. Cette hypothèse est de type asymptotique, étroitement liée à l'instantanéité de la détente. Par contre, lors d'une « détente progressive », la vapeur est générée par autovaporisation, mais, avec un maintien en équilibre du système au cours de son évolution ; une succession d'états quasi – statiques implique une réduction progressive de la température de la matière et, de ce fait, la quantité de vapeur libérée diminue. La quantité d'eau éliminée est, ainsi, plus grande lors d'une détente instantanée que lors d'une détente progressive.

L'ensemble des expérimentations réalisées au laboratoire a montré systématiquement que la quantité d'eau éliminée lors d'une détente instantanée est quasiment 2 fois supérieure à celle obtenue lors d'une détente « quasi-statique » (Rakatozafy, 2001). Ces résultats corroborent le calcul théorique de l'analyse des processus instantanés (Voir Paragraphe II.1.2.1.1)

#### **II.2.4.1.1.3 Établissement du modèle**

C'est au cours de la phase à pression haute  $P_h$  qu'a lieu le transfert de chaleur de l'air vers la surface du produit. Du fait de la mise sous pression, le coefficient de transfert de chaleur par convection  $h$  est calculé à partir du nombre de Reynolds (Convection forcée) et puis à partir du nombre de Grashof (convection naturelle).

Dans l'analyse de l'opération, nous avons opté pour la définition d'une vitesse de séchage  $\omega$ , que l'on peut lier à l'évolution de l'humidité au sein du produit par la relation suivante :

$$\text{Équation II-72} \quad \frac{-dH}{dt} = \omega$$

Au cours d'un cycle la quantité  $\Delta H$  est principalement éliminée par autovaporisation ; on peut alors définir l'efficacité  $\Omega$  d'un cycle de séchage par DDS comme étant égale à :

$$\text{Équation II-73} \quad \Delta H = -\omega t_c = -\Omega$$

Où  $t_c$  est la durée d'un cycle

### **II.2.5 LE SECHAGE PAR MICRO-ONDES**

L'utilisation des micro-ondes permet au cours de la déshydratation de chauffer le produit en volume (les molécules dipolaires telles que l'eau) réduisant ainsi le rôle du transfert interne de température par conduction. Lors d'un transfert d'eau principalement réalisé sous forme « vapeur », le gradient de température est alors inversé et se trouve ainsi en phase avec le gradient de pression partielle de vapeur d'eau. Cette mise en phase des gradients de température et de pression partielle de vapeur d'eau améliore d'une façon considérable le transfert de vapeur d'eau ; les MO interviennent ainsi en tant qu'une deuxième intensification de l'opération de séchage.



**PARTIE III.**  
**ANALYSE EXPERIMENTALE**





## **Chapitre III.1**

### **ANALYSE EXPERIMENTALE DE L'AUTOVAPORISATION**

Les études menées au laboratoire LMTAI depuis 1988 concernant la technologie DIC, le séchage par DDS ainsi que l'atomisation sous vide sont basées sur la thermodynamique de l'instantanéité. Dans la première partie de ces travaux, des études bibliographique, phénoménologique et expérimentale ont été effectuées dans le but de vérifier et de valider les phénomènes observés lors des traitements instantanés et d'établir des « fondements » de la thermodynamique de l'instantanéité. Le dispositif expérimental mis en place est basé sur la technologie de détente instantanée contrôlée DIC.

#### **III.1.1 MATERIEL ET METHODES : INSTANTANEITE**

##### **III.1.1.1 Le dispositif expérimental :**

Pour réaliser des essais d'instantanéité en se basant sur la technologie DIC, nous avons mis en place un dispositif expérimental de taille laboratoire permettant de traiter des gouttelettes d'eau de diamètre inférieur à 2 mm.

##### **III.1.1.1.1 Description du dispositif**

Ce dispositif est composé de quatre parties principales :

1. Un système de compression adiabatique,
2. Une chambre de traitement,
3. Un système de vide,
4. Un système d'acquisition.

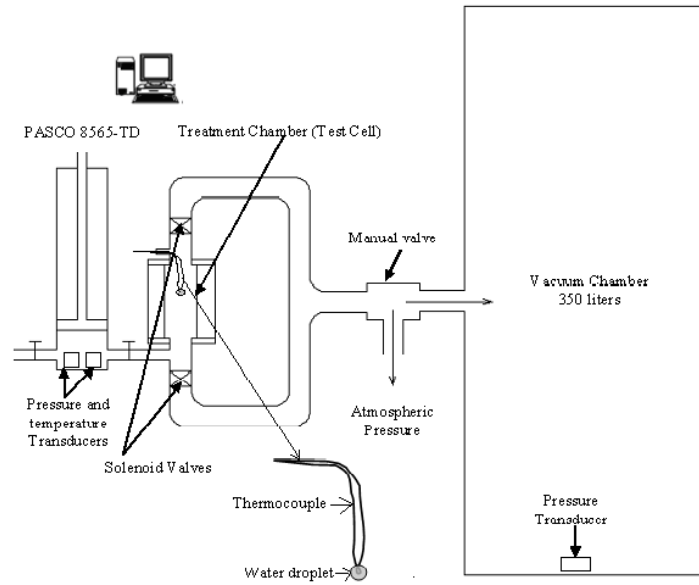


Figure III-1 Schéma du dispositif expérimental de l'étude de l'instantanéité

#### III.1.1.1.1 Système de compression adiabatique

Pour appliquer une pression à l'intérieur de la chambre de traitement, nous avons opté pour l'utilisation d'une compression manuelle de l'air ambiant. Pour cela nous avons choisi d'utiliser le système PASCO-TD 8565, qui permet à travers son piston et son tube en acétal de réaliser des compressions adiabatiques.

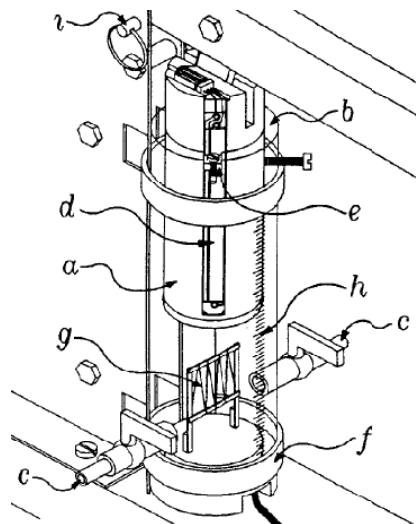
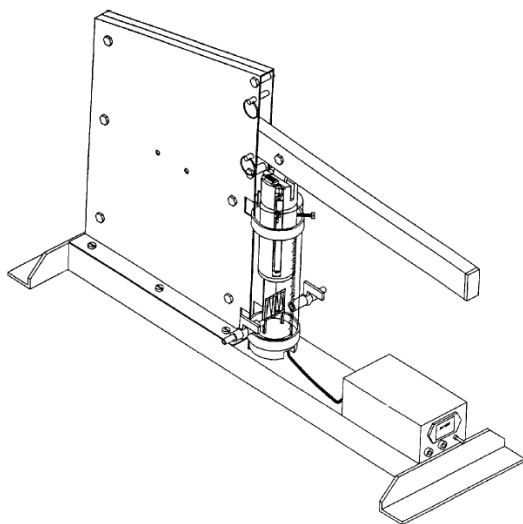


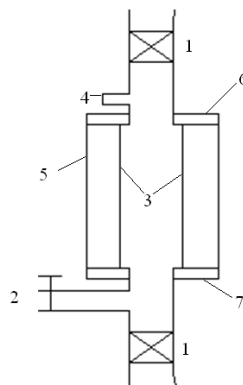
Figure III-2 A gauche : Schéma du système PASCO-TD 85 65 ; A droite : Schéma détaillé du piston de compression

Le piston du PASCO-TD 8565 est un matériau en plastique acétal (figure 14 (a)), il peut être déplacé manuellement à l'intérieur d'un tube acrylique de forme cylindrique(b). Le tube peut être rempli par plusieurs gaz tel que l'argon, l'azote, le dioxyde de carbone. Dans notre cas nous avons utilisé l'air ambiant. Le gaz peut être injecté à travers les robinets en cuivre (c). La position du piston dans le tube est déterminée à l'aide d'un potentiomètre (d,e) permettant à l'ordinateur de calculer le volume de gaz comprimé. Deux capteurs sont montés sur la base fixe du cylindre ; un capteur de température (g) et un capteur de pression (piézo-résistif)(f). La mesure directe de la position du piston dans le cylindre peut être réalisée par la lecture de la graduation sur le tube (h). Deux épingles amovibles (i), sont utilisées pour limiter le mouvement du levier du piston.

Ce système est ensuite connecté directement à la chambre de traitement.

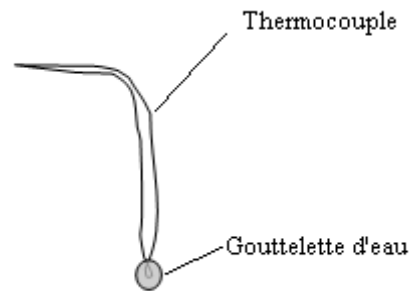
#### III.1.1.1.2 Enceinte de traitement

L'enceinte de traitement est composée d'un tube en plexiglas de 6 cm de hauteur et de 2 cm de diamètre, résistant à des pressions pouvant atteindre 300 kPa, compris entre deux supports en inox dont l'un est fixe (la base) et le deuxième amovible. L'étanchéité du tube est assurée par l'intermédiaire de joint spéciaux et d'un système de vis et d'écrous reliant les deux supports.



*Figure III-3 Schéma de l'enceinte de traitement : 1) Électrovannes à ouvertures instantanées, 2) Connexion avec PASCO-TD 8565, 3) Tube en plexiglas, 4) Entrée thermocouple, 5) Système vis et écrous, 6) Support amovible, 7) Support fixe*

Un thermocouple de type k, de 75  $\mu\text{m}$  de diamètre avec un temps de réponse inférieur à 2 ms (Omega Engineering) a été installé à l'intérieur du tube de la façon suivante :



*Figure III-4 Schéma thermocouple et disposition de la gouttelette d'eau*

#### **III.1.1.1.1.3 Système de vide**

L'enceinte de traitement communique avec le réservoir à vide par l'intermédiaire de 2 électrovannes à ouvertures instantanées commandées simultanément par un boîtier électrique. La cuve à vide possède un volume de 350 litres. Le vide est assuré par une pompe à vide Alcatel SD 2500. Le niveau minimum de vide atteint était de 900 Pa. L'enceinte de vide est équipée d'un capteur de pression KELLER (-1 ; 5 bars)

#### **III.1.1.1.1.4 Système d'acquisition**

Pour avoir une bonne acquisition des données mesurées lors des expériences, nous avons relié l'ensemble des capteurs de mesure à un ordinateur, équipé du logiciel LabVIEW et du logiciel Driver NI-DAQ, par l'intermédiaire d'une interface USB-9215 (National Instruments) avec 4 canaux. et une résolution de 16 bits (Temps de conversion 4 canaux = 10  $\mu\text{s}$ ).

Les données ont été enregistrées sous LabVIEW et ensuite transférées sous Excel pour être analysées.

### III.1.1.1.2 Protocole d'expérimentation

A l'aide d'une seringue nous avons posé une goutte d'eau déminéralisée sur le thermocouple de l'enceinte de traitement. Ensuite, la chambre de traitement est fermée hermétiquement à l'aide du système vis et écrous. Le piston est mis en position haute en injectant de l'air ambiant dans le cylindre. Nous commençons ainsi l'acquisition à l'aide du logiciel LabVIEW. Une fois le piston comprimé rapidement, les électrovannes sont ouvertes pour relier l'enceinte de traitement à la cuve à vide. Ensuite les électrovannes sont fermées et le système est remis à la pression atmosphérique.

## III.1.2 EXPERIMENTATION

Afin de valider l'étude fondamentale des phénomènes instantanés que nous avons réalisée, nous avons mené une série d'expérimentation sur une gouttelette d'eau suspendue à un thermocouple.

Une gouttelette, d'un diamètre inférieur à 2 mm, suspendue à un thermocouple type K (75  $\mu\text{m}$ , temps de réponse < 2ms) a subi une compression d'air suivie d'une détente instantanée vers le vide ( $|\Delta P/\Delta T| > 3 \text{ bar} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Cette compression a été effectuée manuellement à l'aide d'un piston en acétal en mouvement dans un tube en plastique acrylique (PASCO-TD 8565). Ce tube communique avec l'enceinte de traitement à l'aide d'un tuyau.

Suite à la détente, la goutte d'eau est restée attachée au thermocouple. Seul son volume a baissé, mais cette baisse n'a pas pu être quantifiée.

### III.1.2.1 Résultats

La pression maximale dans le tube pouvait atteindre 200 kPa et la pression du vide était inférieure à 5 kPa. Pour étudier l'effet de l'instantanéité, nous avons également réalisé des expériences avec des détentes lentes (quasi-statiques). ( $|\Delta P/\Delta T| < 1 \text{ bar} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Le traitement de la goutte d'eau comporte trois étapes principales :

- Une première étape qui correspond au lancement de l'acquisition (ET1)
- Une étape de compression (ET2)

- Une étape de détente instantanée et la remise à l'équilibre de la température de la goutte

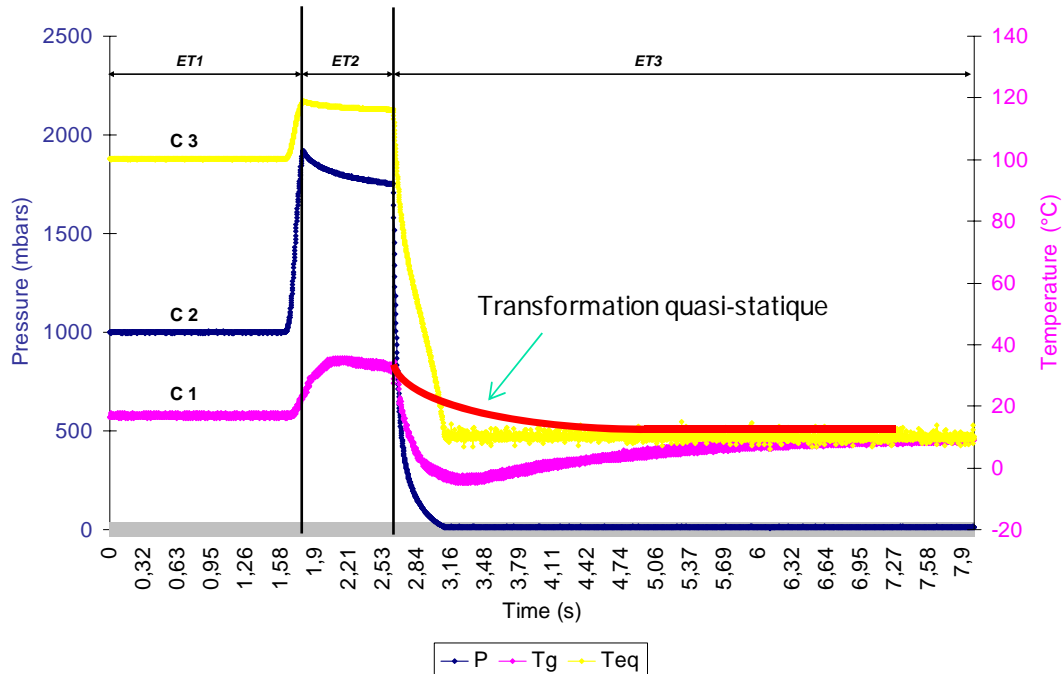


Figure III-5 , C1 est la variation de la température de la gouttelette d'eau, C2 est la variation de la pression de l'enceinte de traitement et C3 la variation de la température de saturation ; ET1 est la période de mise sous haute pression, ET2, la période de maintien sous haute pression et ET3 la période de détente vers la basse pression

Les résultats obtenus montrent que lors d'une détente instantanée, la température de la goutte atteint des valeurs inférieures à la température d'équilibre à la pression de saturation du vide. Alors que lors d'une détente lente (quasi-statique) la température, quand elle est inférieure à celle à la pression de saturation, reste quasiment constante. Ces résultats confirment les résultats théoriques obtenus lors de l'étude fondamentale des phénomènes instantanés.

Les résultats obtenus avaient l'allure générale suivante :

Nous avons remarqué lors de la détente instantanée vers le vide ( $\Delta P/\Delta T = -380$  kPa/s ;  $P_v = 1,2$  kPa, la pression initiale étant de  $P_h = 180$  kPa) que la température de la gouttelette passe de  $33^\circ\text{C}$  à  $-5^\circ\text{C}$  avant de se remettre à la température d'équilibre de  $9,6^\circ\text{C}$ .

Notons enfin que la température de l'air, dans tous les cas étudiés, atteignait environ  $70^\circ\text{C}$  lors de la compression et  $-30^\circ\text{C}$  lors de la détente. Dans le tableau ci-dessous (Tableau III-1) sont résumés une série des résultats obtenus :

Tableau III-1 Résultats de traitement d'une gouttelette d'eau

$P_{\max}$ (kPa)	$P_{\text{vide}}$ (kPa)	$\Delta P/\Delta t$ (kPa/s)	$T_{\max}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{\min}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{\text{eq}}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$\Delta T = T_{\min} - T_{\text{eq}}$
190	1,5	-378	31,6	0,2	13	-12,8
170	1,6	-377	29,6	-2,2	14	-16,2
190	1,7	-390	31,6	0,1	15	-14,9
193	1,6	-392	32,9	-4,3	14	-18,3
192	1,2	-386	29	-2,3	9,6	-11,9
180	1,2	-380	33	-5	9,6	-14,6
194	1,1	-370	34,9	-3,6	8,5	-12,1

En faisant un simple bilan thermique, nous savons que la quantité de chaleur emmagasinée par la gouttelette va servir à évaporer une partie de l'eau.

$$\text{Équation III-1} \quad m_g c_p \Delta T = m_{ev} L$$

Où

- ✚  $m_g$  est la masse de la gouttelette d'eau (kg)
- ✚  $c_p$  est la capacité calorifique de l'eau (j/kg $^\circ\text{C}$ )
- ✚  $m_{ev}$  est la masse d'eau évaporée (kg)
- ✚  $L$  est la chaleur latente de vaporisation (j/kg)
- ✚  $\Delta T$  est la différence de température ( $^\circ\text{C}$ ).

Nous considérons deux cas :

1. La détente est instantanée et la différence de température qui va servir à l'autovaporisation de l'eau est égale à :

$$\text{Équation III-2} \quad \Delta T_i = (T_{\max} - T_{\min})$$



2. La détente est lente (quasi-statique), le système évolue vers son état d'équilibre, la différence de température s'écrit alors :

$$\text{Équation III-3} \quad \Delta T_q = (T_{max} - T_{eq})$$

Le rapport entre la masse d'eau évaporée lors d'une détente instantanée et celle évaporée lors d'une détente quasi-statique est donnée par :

$$\text{Équation III-4} \quad \frac{m_{ev}^{instantanée}}{m_{ev}^{quasi-statique}} = \frac{\Delta T_i}{\Delta T_q}$$

Dans les cas étudiés, ce rapport était généralement supérieur à 1,6

Alors que lors d'une détente lente ( $\Delta P/\Delta T = -1,46 \text{ kPa/s}$   $P_v = 3,5 \text{ kPa}$ , la pression initiale étant de  $P_h = 100 \text{ kPa}$ ) la température de la goutte reste quasi constante en dessous de température à la pression de saturation. Lors de ces expérimentations quasi-statiques nous n'avons pu, avec ce dispositif expérimental, effectuer les détentes qu'à partir de la pression atmosphérique.

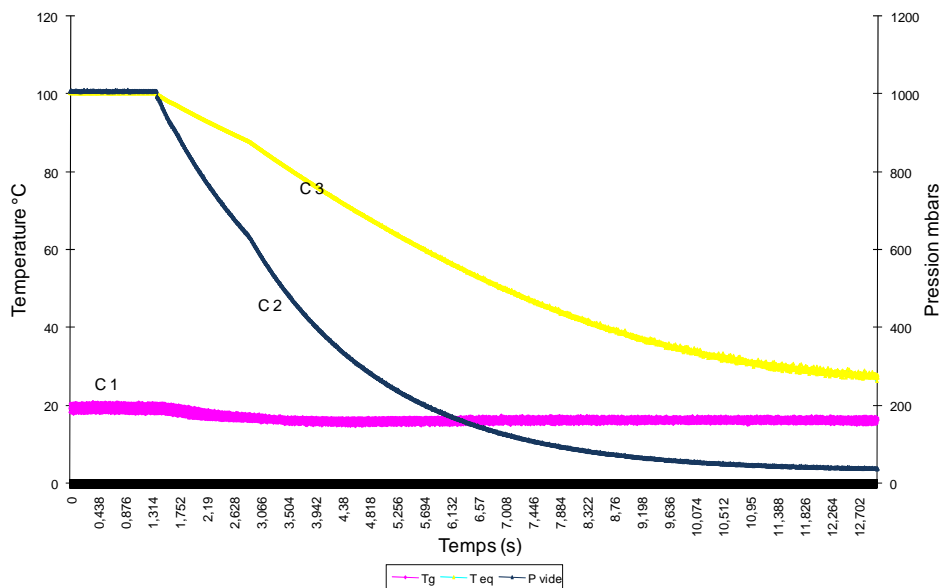


Figure III-6 Variation de la température de la gouttelette d'eau lors d'une détente lente (décompression) C1 est la variation de la température de la gouttelette, C2 la variation de la pression de l'enceinte de traitement et C3 la variation de la température de saturation

### III.1.2.2 Interprétation

Lors de ces expériences, nous avons pu observer l'évolution du système vers un nouvel état d'équilibre. Nous avons remarqué que la détente instantanée implique le passage par un état intermédiaire de non-équilibre qui est caractérisé, selon la théorie de ALLAF, par une génération d'entropie nulle. En effet, la quantité de vapeur générée, par autovaporisation d'une partie de l'eau de la gouttelette, est fonction de la température initiale de la goutte (avant la détente) et de la pression finale du système. Cette quantité dépend également la vitesse de la détente. Le système, en déséquilibre complexe, cherche à atteindre en tout premier lieu son équilibre mécanique (pression) ensuite son équilibre de phase (vapeur) et enfin son équilibre thermique. Une priorité existe pour chacun de ces équilibres. Pour atteindre son équilibre mécanique, le système évolue en s'éloignant de son équilibre de phase et pour atteindre ce dernier, sa température s'écarte encore plus de celle d'équilibre.

Nous avons aussi remarqué lors de ces expériences que la température s'oppose à la variation de la pression (la chute de pression induit une génération d'entropie positive ( $\Delta S_p > 0$ )) à travers une baisse considérable en deçà de son point d'équilibre (transformation complexe à 2 paramètres : Pression et Température). Cette baisse de température est caractérisée par génération d'une entropie totale négative ( $\Delta S_T < 0$ ) de telle sorte que  $\Delta S_p + \Delta S_T \rightarrow 0$  !

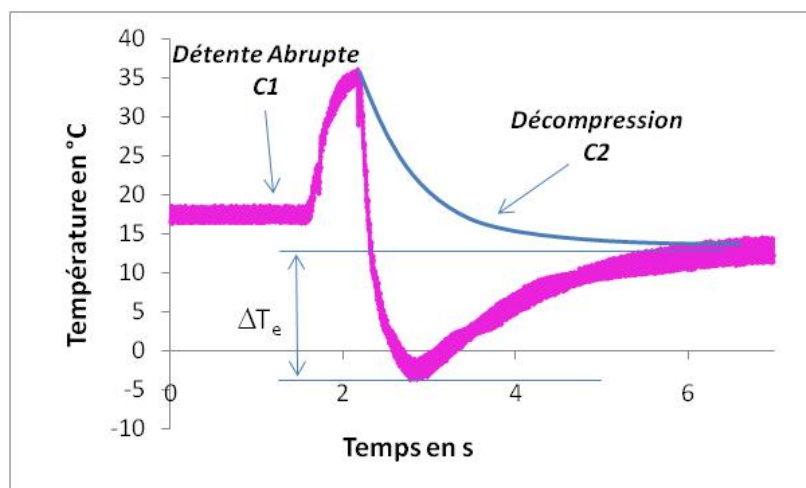


Figure III-7 Variation de la température de la gouttelette d'eau en fonction du temps (Détente instantanée et détente quasi-statique)

L'opposition de la température à la variation de la pression est clairement identifiée sur la courbe ci-dessus (C1). Si la détente était quasi-statique, elle aurait suivi la courbe (C2). Les phénomènes physiques peuvent être abordés ainsi de deux manières : soit par la limite des transformations quasi-statiques, soit par la limite des transformations instantanées.

Les variations de la température de la goutte d'eau en fonction du temps selon le type de transformation sont représentées sur la figure ci-dessous.

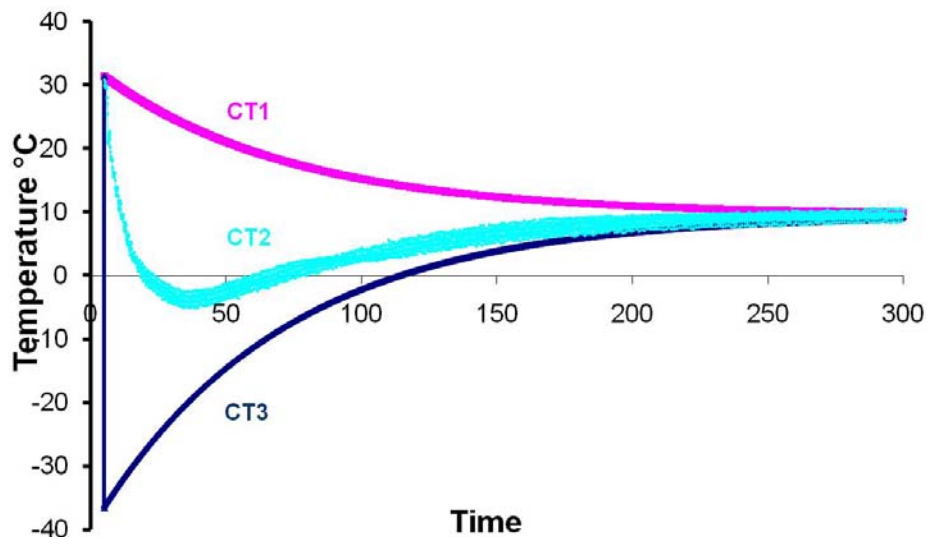


Figure III-8 CT1 : Transformation quasi statique ; CT2 : Transformation instantanée réelle ; CT3 : Transformation Instantanée Théorique

### III.1.2.3 L'expansion par détente instantanée

La texturation par détente instantanée contrôlée des produits alimentaires a fait l'objet de nombreuses études au sein de notre laboratoire à partir de 1988 afin d'améliorer les vitesses de séchage ainsi que la qualité de produits finis.

Cette texturation par expansion intervient quand le produit subit un traitement sous pression de vapeur ( $P < 2$  MPa) de type HTST, haute température ( $T < 200^\circ\text{C}$ ) courte durée ( $t < 1$  min), suivi d'une détente instantanée vers le vide (5 kPa,  $\Delta T < 200$  ms). Ce taux d'expansion dépend étroitement de la vitesse de détente. Plus cette dernière est « abrupte » et plus le taux d'expansion est élevé !

Nous avons réalisé au cours de cette étude, des expériences afin de mesurer la variation du taux d'expansion de la pomme (variété Grany Smith) par DIC en fonction de la vitesse de détente et de déterminer la diffusivité effective lors du séchage par air chaud à  $45^\circ\text{C}$ . Ces expériences seront détaillées dans le chapitre suivant. Les principaux résultats montrent que le taux d'expansion ainsi que la diffusivité effective diminuent quand la vitesse de détente est réduite:

Ce même processus d'expansion constitue le point faible du séchage du papier par Impulse drying qui consiste à faire subir au papier humide une pression de 2 à 6 MPa et une température entre 150 et  $300^\circ\text{C}$  suivi d'une chute abrupte de la pression vers la pression atmosphérique (20-40 ms). Il s'en suit l'expansion du papier, ce phénomène est souvent connu sous le nom de délamination.

#### **III.1.2.3.1 Explication par la théorie de l'instantanéité**

En se basant sur la théorie de l'instantanéité, le phénomène d'expansion peut être interprété de la manière suivante :

La quantité de vapeur générée par autovaporisation d'une partie de l'eau engendre des contraintes mécaniques au sein même du produit induisant son expansion.

En effet, un processus de génération d'entropie totale accompagne l'évolution du système vers son nouvel état d'équilibre ; l'instantanéité de la détente implique le passage obligatoire par un état intermédiaire de non-équilibre caractérisé par une génération d'entropie totale nulle. La quantité de vapeur générée lors de la détente dépend de la température initiale du produit, de la température minimale atteinte et de la vitesse de la détente. La modification de la structure (expansion, alvéolation,...) du produit dépend de ses caractéristiques hydro-thermo-rhéologiques. Il est important de noter que la température de transition vitreuse des produits a un impact important sur

la rigidification de la forme expansée. Le traitement par détente instantané contrôlée induit une diminution de la teneur en eau du produit, par autovaporisation, et de sa température par refroidissement lié à l'autovaporisation ; le produit traverse donc la frontière de la transition vitreuse.

La détente instantanée induit une chute brutale de la température en dessous de celle de l'équilibre définie par la pression finale (génération d'entropie négative) qui vient s'opposer à la variation abrupte de pression (entropie générée positive) de telle sorte que l'entropie totale générée soit nulle (approche asymptotique,  $\Delta S_P + \Delta S_T \rightarrow 0$ ). Cette baisse de température conduit à une génération importante de vapeur et une expansion immédiate du produit.

La température se trouve généralement en dessous de la température de transition vitreuse, ce qui implique une rigidification de la structure expansée au voisinage de son niveau maximal.

## Chapitre III.2

### ANALYSE EXPERIMENTALE DU SECHAGE : DOUBLE INTENSIFICATION

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents appareils de séchage, l'ensemble des protocoles qui ont été utilisés pendant cette thèse ainsi que les résultats expérimentaux obtenus.

#### III.2.1 MATERIEL ET METHODES : SECHAGE

##### III.2.1.1 Le réacteur DIC

La DIC est un traitement de type HTST (Haute température courte durée) qui consiste à faire subir à un produit partiellement humide (en général l'humidité varie autour de 30%) une pression de vapeur ( $P < 20$  bars) à haute température (inférieure à  $200^{\circ}\text{C}$ ) durant une courte durée (inférieure à la minute) suivie d'une chute abrupte de pression vers le vide ( $50\text{ mbars}$ ,  $\Delta t < 200\text{ ms}$ ). Cette chute de pression est caractérisée par une très grande vitesse ( $\Delta P / \Delta t > 2,5 \cdot 10^5\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

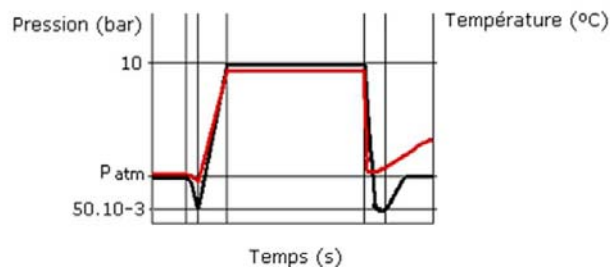


Figure III-9 Principe de la DIC

Le traitement par DIC comporte quatre étapes :

1. Instauration d'un vide préliminaire pour assurer un contact intime entre la vapeur et le produit,
2. Injection de la vapeur ( $P < 20$  bars,  $T < 200^{\circ}\text{C}$ ) pendant une courte durée (quelques dizaines de secondes),
3. Détente instantanée vers le vide ( $\Delta T \sim 200\text{ ms}$ ), cette chute abrupte de pression entraîne un refroidissement instantané du produit

4. Remise à la pression atmosphérique.

Le réacteur DIC-MP (Moyenne pression) a été réalisé en 1993 et a servi pour le traitement des différents produits solides et à l'extrapolation du procédé à l'échelle industrielle.

### III.2.1.1.1 Description du réacteur

Ce réacteur est composé de quatre parties principales :

1. Une chambre de traitement,
2. Un système à vide,
3. Un système de connexion,

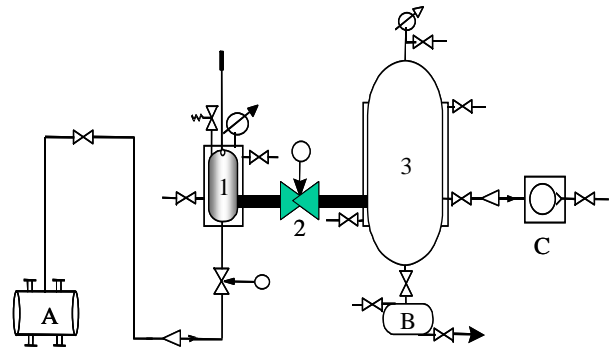


Figure III-10 A gauche : Photos DIC-MP, A droite : présentation schématique du réacteur DIC utilisé (1: Chambre de traitement; 2: valve de détente abrupte; 3: Réservoir à vide; A: générateur de vapeur; B: condenseur; C: pompe à vide).

#### III.2.1.1.1.1 La chambre de traitement

La chambre de traitement est un autoclave en inox de forme cylindrique de 22 cm de diamètre, de 12 litres de volume, résistant à des pressions allant de 0 à 0,7 MPa et à des hautes températures (de la température ambiante jusqu'à 200°C).

La charge en produit s'effectue par le haut. La chambre de traitement est fermée à l'aide d'une trappe dont l'étanchéité est assurée par un double joint gonflable à l'air comprimé.

La chambre de traitement possède une double enveloppe permettant de chauffer le réacteur afin d'éviter le phénomène de condensation. Un hublot ainsi qu'un système

d'éclairage permettent de visualiser le produit au cours du traitement. La chambre de traitement est également équipée d'un manomètre.

#### **III.2.1.1.1.2 Le système à vide**

Le système à vide se compose d'un réservoir à vide 1600 litres en inox, relié à la chambre de traitement par un conduit en  $\frac{1}{4}$  de tour. Le réservoir à vide est connecté à une pompe à vide à anneaux liquides. Le niveau de vide pouvant être atteint est de 50 mbar.

#### **III.2.1.1.1.3 Le système de connexion**

La détente instantanée est effectuée par connexion entre la chambre de traitement et le réservoir à vide à l'aide d'une vanne papillon électro- pneumatique de 20 cm de diamètre. Cette vanne électro- pneumatique permet d'assurer une détente vers le vide en une durée inférieure à 200 ms. Différents diaphragmes peuvent être installés au niveau de la vanne de connexion. Les diaphragmes utilisés lors de cette thèse sont des disques en inox percés en leur centre d'un orifice de diamètres variables (1 mm, 2 mm, 5 mm, 6 mm, 10,5 mm et 20 mm). L'installation des diaphragme nous a permis d'étudier l'effet de l'instantanéité sur le traitement des différents produits. En effet, la variation du diamètre d'ouverture permet de contrôler la durée de la détente. Le tableau ci-dessous donne la durée de la détente mesurée en utilisant les différents diaphragmes pour passer d'une pression de 500 kPa à 20 kPa dans la chambre de traitement

<b>Diamètres des ouvertures des diaphragmes</b>	<b>Surface de l'ouverture</b>	<b>Durée de la détente<sup>1</sup></b>
---	-------------------------------	--

---

<sup>1</sup> Les mesures ont été réalisées sur l'HTV (Kristiawan, 2006) (Kristiawan, et al., 2007) (Kristiawan, et al., 2008)



1 mm	0,785 mm <sup>2</sup>	99,6 s
2 mm	3,14 mm <sup>2</sup>	93,6 s
5 mm	19,63 mm <sup>2</sup>	32,5 s
6 mm	28,28 mm <sup>2</sup>	21,1 s
10 mm	78,5 mm <sup>2</sup>	7,8 s
20 mm	314,16 mm <sup>2</sup>	2 s
200 mm (ouverture totale)	314159,2 mm <sup>2</sup>	150 ms

### III.2.1.2 Le réacteur DDS

#### III.2.1.2.1 Présentation de la Déshydratation par Détentes Successives (DDS)

Le procédé DDS utilise principalement le phénomène d'autovaporisation déjà rencontré dans le procédé DIC. La DDS se distingue cependant de la DIC par le fait qu'il s'agit d'une méthode de séchage par elle-même. Au plan technique, le produit ne subit aucun traitement thermique notable; seuls de faibles échanges de chaleur avec un gaz lors du remplissage de la chambre de traitement peuvent avoir lieu. En effet, un avantage de la DDS est le travail à des températures modérées (généralement voisines de l'ambiante), ce qui favorise son utilisation pour les produits thermosensibles.

Le procédé DDS est en fait une succession de cycles DIC. Les étapes d'un cycle de la DDS sont donc identiques à celles du traitement DIC.

En DDS, le produit subit une succession de cycles de mise sous pression (1 à 10 bar), suivie d'une détente abrupte vers une basse pression généralement inférieure à la pression atmosphérique. A chaque détente une partie de l'eau contenue dans le produit est éliminée par autovaporisation; la quantité évaporée dépend à la fois du système, de la structure du produit, de l'état de l'eau et des conditions opératoires utilisées (pression, température...). Le séchage par DDS fait appel à de l'air à température ambiante, comprimé en vue d'aboutir à la pression recherchée, il est tout autant envisageable d'utiliser d'autres gaz neutre.

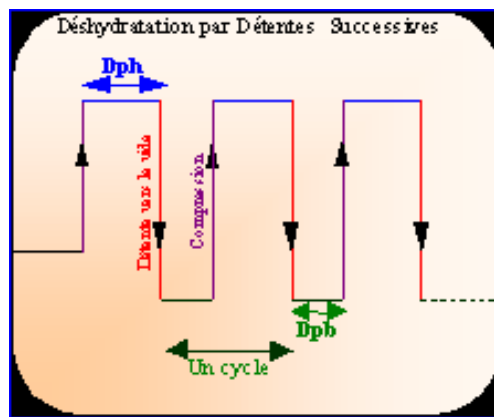


Figure III-11 Schéma du cycle de DDS ( $P_h$ -Pression haute,  $P_b$ -Pression basse,  $D_{ph}$ -Durée du palier haut,  $D_{pb}$ -Durée du palier bas)

La pression oscille donc entre deux valeurs: le niveau de pression haute ( $P_h$ ) et le niveau du vide ou pression basse ( $P_b$ ). Le premier cycle commence avec une mise sous vide initiale, ensuite plusieurs étapes se suivent:

- La chambre de traitement est mise sous pression, Une fois la pression haute atteinte, une phase appelée palier haut est maintenue pendant un temps  $D_{ph}$  (durée du palier haut).
- Une détente instantanée est ensuite opérée, suivie d'un certain temps d'attente avant de poursuivre le cycle. Cet ensemble dure un temps  $D_{pb}$ . La détente provoque le refroidissement du produit et amène le produit à un état d'équilibre caractérisé par la pression d'équilibre du vide après la détente,  $P_{\text{éq}}$ .
- Le produit est laissé sous pression basse  $P_b$  pendant la durée du palier bas  $D_{pb}$ , au bout de laquelle le cycle suivant peut commencer. Le séjour sous vide permet d'évacuer l'air (voie mécanique) et l'eau vaporisée (voie mécanique et condensation); sa durée peut souvent être imposée par la capacité de la pompe à atteindre le niveau de vide souhaité dans le réservoir pour le cycle suivant.

La DDS est donc une méthode de séchage sous vide discontinu, où, contrairement à la méthode classique de séchage sous vide, les deux processus d'apport de chaleur et d'élimination d'eau se produisent successivement et non simultanément.

### III.2.1.2.2 Description du réacteur

Le réacteur DDS a été utilisé lors de cette étude pour effectuer le séchage des fruits et légumes en morceaux à partir de leur humidité critique. La conception de ce réacteur ressemble à celle du réacteur DIC. Il est constitué de trois parties principales :

- 1) une chambre de traitement,
- 2) un système de connexion,
- 3) un réservoir à vide.

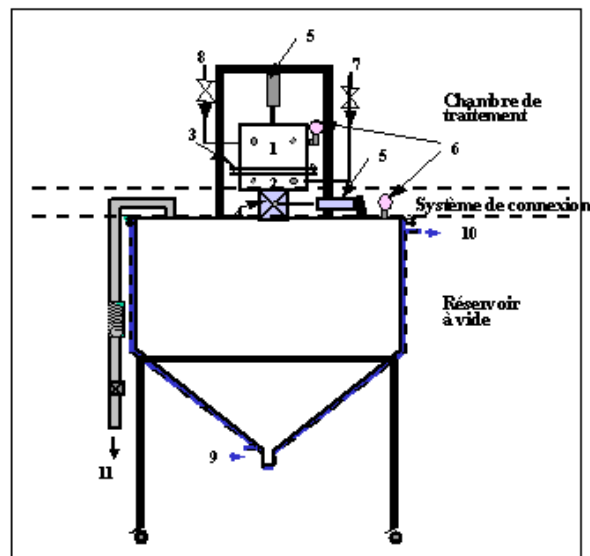


Figure III-12 Schéma du réacteur DDS (1-cloche; 2-base fixe de la chambre de traitement; 3 : système de fermeture; 4-vanne de détente; 5- vérin; 6- manomètres; 7- entrée de vapeur; 8- entrée de gaz; 9-entrée d'eau dans la double enveloppe; 10- sortie d'eau dans la double enveloppe; 11- vers la pompe à vide)

#### III.2.1.2.2.1 La chambre de traitement

L'enceinte de traitement en inox possède un volume de 2 litres, elle est résistante à des pressions pouvant atteindre 0,6 MPa et à des températures allant de la température ambiante jusqu'à 200°C. La chambre de traitement est composée de deux parties:

- ✓ une base fixe (figure ci-dessus) placée au dessus du système de connexion, comportant dans sa partie basse, un porte-échantillon.
- ✓ Une cloche supérieure (figure ci-dessus) actionnée par un vérin pneumatique, qui permet l'ouverture et la fermeture de l'enceinte. Un circuit d'air comprimé

(le fluide utilisé dans le cadre de notre étude) alimente cette chambre. Un manomètre est connecté à cette cloche.

La chambre de traitement est fermée par un système de vis et d'écrous qui relie la cloche et la base fixe.

#### **III.2.1.2.2.2 Le système de connexion**

Ce système de connexion est constitué d'une vanne à siège incliné, entièrement en inox, à ouverture contrôlée par un vérin pneumatique assurant une connexion rapide entre l'enceinte de traitement et le réservoir à vide (Détente Instantanée Contrôlée vers le vide).

#### **III.2.1.2.2.3 Le réservoir à vide**

Le réservoir à vide possède un volume de 300 litres, il est équipé d'une double enveloppe. Le vide est assuré à l'aide d'une pompe à anneau liquide. Le niveau de vide minimum atteint dans ce réservoir est de 5 kPa.

#### **III.2.1.2.2.4 Système d'acquisition**

Le séchage des fruits et légumes en morceaux par DDS était entièrement automatisé. En effet, au cours de ce travail, le traitement a nécessité la répétition de 60 cycles identiques pour une durée totale de traitement allant de 15 minutes à 1 heure.

Les paramètres à contrôler lors de l'automatisation des cycles DDS sont:

- le niveau de pression haute ( $P_h$ ),
- la durée de palier haut ( $D_{ph}$ ),
- la durée du palier bas ( $D_{pb}$ ).

Nous avons fixés ces paramètres selon le plan d'expérience établi, ils ont été modifiés à chaque nouveau traitement. Le niveau de pression basse  $P_b$  quant à lui, était fixé à  $P_b=5$  kPa (DDS-VAC) pour un traitement DDS sous vide et à  $P_b=100$  kPa (DDS-ATM) pour un traitement DDS sous pression atmosphérique)

La mise sous pression, l'ouverture de la vanne de détente à la fin de chaque palier haut, sa fermeture ainsi que la remise sous pression pour le cycle sont effectuées automatiquement.

Le système de mesure et d'acquisition des données contrôlait

- la pression dans la chambre de traitement,
- la pression dans le réservoir à vide

Le réacteur DDS a été relié à un ordinateur équipé d'une carte d'acquisition Lab PC, du logiciel LabVIEW et du logiciel Driver NI-DAQ (NATIONAL INSTRUMENTS).

Les capteurs de pression et les différentes électrovannes (entrée de gaz, commande des vérins d'ouverture/fermeture cloche et vérin de commande de la vanne de vide) sont reliés à la carte d'acquisition par un ensemble de modules de conditionnement de signaux SCXI (Signal Conditioning extension for Instrumentation) regroupés dans un châssis SCXI-1000 (NATIONAL INSTRUMENTS). L'acquisition des données ainsi que le pilotage du système étaient réalisés par l'intermédiaire programme développé sous LabVIEW.

### **III.2.1.3 L'atomisation sous vide (VCS)**

En 2002, Manuel DELGADO au cours de ses travaux de recherche a défini et mis en place un système de pulvérisation sous vide. Basé sur le principe de la technologie DIC, l'atomisation sous vide est conçue pour le traitement des produits pompables, elle consiste à pulvériser une substance liquide chauffée dans un réservoir à vide à travers une buse à partir d'une haute pression.

#### **III.2.1.3.1 Description Dispositif**

L'équipement expérimental de Pulvérisation Contrôlée sous Vide (Vacuum Controlled Spraying reactor VCS), calqué sur le principe de la DIC et présenté sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable**. La matière homogénéisée dans une cuve est envoyée à l'aide d'une pompe vers un échangeur où elle est chauffée (température maximale prévue est de 100°C). Le débit est régulé à partir du nombre de tours par minute de la pompe qui assure un niveau de 2,7 MPa dans le circuit de pulvérisation. Dans l'enceinte de traitement, la buse peut être placée soit sur la partie supérieure soit sur la partie latérale de la chambre.

Le produit pulvérisé est récupéré soit par effet gravitationnelle dans l'enceinte de traitement soit dans un cyclone placé entre le réservoir à vide et l'enceinte de traitement qui empêche l'évacuation du produit avec la vapeur.

Un système de sas permet de récupérer le produit en bas de l'enceinte de traitement.

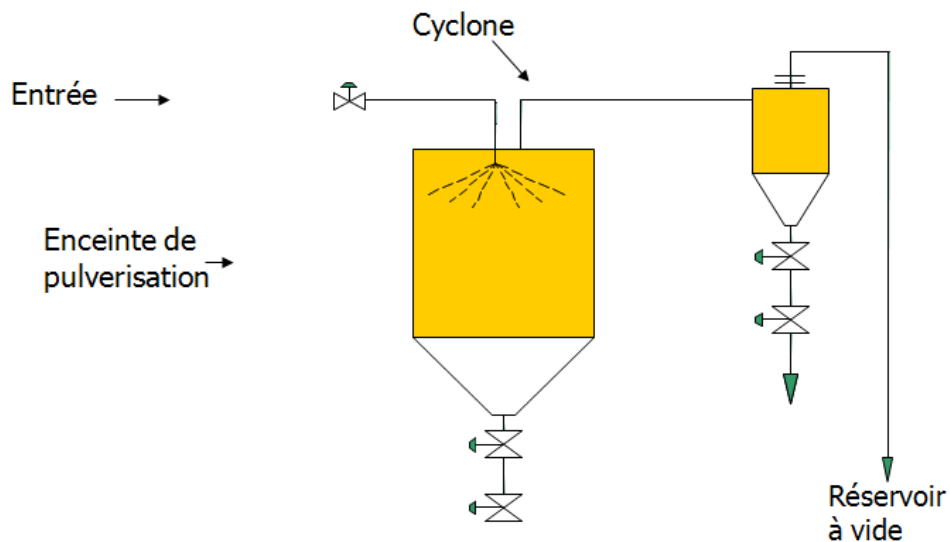


Figure III-13: Schéma général du réacteur à Pulvérisation Contrôlée sous Vide (Vacuum Controlled Spraying reactor VCS).

Le système de vide est formé d'une pompe à anneau liquide et d'un éjecteur à vapeur. Un système de refroidissement et un condenseur améliorent le niveau de vide.

Une cuve à vide est également utilisée comme condenseur pour piéger la vapeur produite à l'aide d'une double enveloppe et une machine cryogénique assurant le maintien de la surface interne de la cuve à une température relativement faible.



*Figure III-14: Photo de l'équipement expérimental.*

#### **III.2.1.3.2 Programme d'acquisition des données LABVIEW.**

Les signaux électriques des divers capteurs sont envoyés à un système d'acquisition de données permettant d'enregistrer les évolutions des pressions et des températures au cours d'un essai. Ce système d'acquisition de données est muni d'une carte Advantech mod. PCL-818HG avec une carte de connexions mod. PCLD-8115 de 16 voies.

Un programme réalisé avec le logiciel Labview permet de visualiser en temps réel et enregistrer l'évolution de certains paramètres (température et pression) pour une modification éventuelle de ceux-ci pendant un essai de pulvérisation.

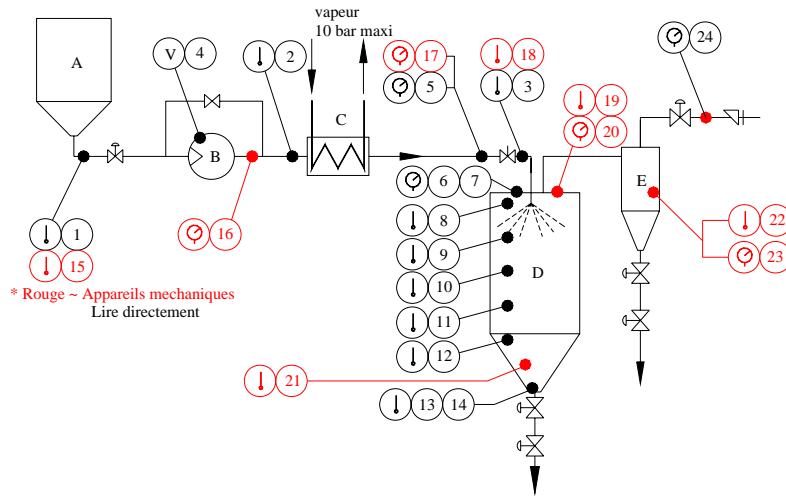


Figure III-15: Schéma d'appareillage de mesure du dispositif expérimental.

### III.2.1.4 Le séchage par micro-ondes

Les sources micro ondes utilisées sont de type domestique classique LP 2188 avec une fréquence de 2450 Mhz et une puissance maximale de 900W. Le four a subi une petite modification, nous avons introduit une conduite d'air comprimé permettant une ventilation importante d'air à température ambiante permettant l'évacuation des vapeurs d'eau issues du séchage.

#### III.2.1.4.1 Protocole d'analyse

L'étude de la cinétique de séchage par micro-onde a été réalisée en utilisant 3 puissances différentes (360 W, 540 W et 720 W). Le séchage était effectuée par cycles (1 min 30 s/cycle), chaque cycle correspondait à l'application des micro-ondes à une puissance donnée pendant 30 s suivie d'un balayage d'air pendant 60 s. A la fin de chaque cycle, les produits sont pesés sur une balance de précision Sartorius. La cinétique de séchage était ainsi déterminée par l'évolution de la masse des produits après chaque cycle.

Étant donnée l'hétérogénéité du chauffage par micro-ondes, nous avons réalisé trois répétitions pour chaque produit à chaque puissance et nous avons déterminé la valeur moyenne. L'humidité du produit à un instant t est calculée en utilisant la formule suivante :



$$\text{Équation III-5} \quad H(t)(\%) = \frac{m_{\text{eau initiale}} - m_{\text{eau enlevée}}(t)}{m_{\text{initiale produit}}}$$

Cette équation peut être écrite alors sous la forme suivante :

$$\text{Équation III-6} \quad H(t)(\%) = \frac{m_{\text{initiale produit}} \cdot h(\%) - (m_{\text{initiale produit}} - m_{\text{produit}}(t))}{m_{\text{initiale produit}}}$$

Où  $h(\%)$  est l'humidité initiale du produit

### III.2.1.5 Étuve :

Le séchage conventionnel par air chaud des fruits et légumes en morceaux a été réalisé en utilisant deux étuves, une pour le séchage initiale (jusqu'à atteindre l'humidité critique bien déterminée) et l'autre pour le séchage final.

#### III.2.1.5.1 Séchage initial

L'étuve utilisée est une étuve MEMMERT, la ventilation des produits est assurée par l'air comprimé sec. L'air entrant dans l'étuve peut être chauffé à l'aide des résistances qui se trouvent le long de la paroi. Nous avons maintenu une température de 30 °C lors de ce traitement.

#### III.2.1.5.2 Séchage final

L'étuve utilisée pour le séchage finale est une étuve AC 240. La température de l'air entrant a été réglée selon les plans d'analyses (30°C, 45°C et 60°C). Pour déterminer la cinétique de séchage, l'évolution de la masse des produits a été suivie pendant 2 heures (Toutes les 5 minutes le premier quart d'heure et ensuite toutes les 15 min) en utilisant une balance de précision de type Sartorius. Étant donné l'hétérogénéité du séchage le long d'un plateau, nous avons réalisé 3 répétitions pour chaque produit à chaque température et nous avons déterminé la valeur moyenne. L'humidité du produit à un instant  $t$  est alors déterminée en utilisant les équations du paragraphe (IV.3.1)

### III.2.1.6 Méthodes de caractérisation

Les fruits et légumes en morceaux ont été déshydratés en couplant différents procédés de séchage et en comparant les résultats avec les procédés classiques. La comparaison s'est faite au niveau de la cinétique de séchage ainsi qu'au niveau des propriétés

physico- chimiques des produits séchés. Ces propriétés regroupent la mesure du taux d'expansion, de la cinétique de réhydratation ainsi que la mesure de la teneur en eau.

#### III.2.1.6.1 Mesure de la teneur en eau des produits :

La mesure de la teneur en eau des fruits et légumes en morceaux a été réalisée principalement selon la méthode AFNOR et en utilisant un analyseur électronique d'humidité pour la vérification de quelques valeurs.

##### III.2.1.6.1.1 Méthode AFNOR (Étuve Air Chaud)

La teneur en eau est mesurée principalement par la différence de masse entre le produit humide et le produit séché par air chaud à 105°C pendant 24 h. La teneur en eau base sèche est donnée par :

$$\text{Équation III-7} \quad w(\%) = \frac{m_{\text{initiale produit}} - m_{\text{finale produit}}}{m_{\text{finale produit}}}$$

Et l'humidité du produit ou teneur en eau base humide est donnée par :

$$\text{Équation III-8} \quad H(\%) = \frac{w(\%)}{1+w(\%)}$$

##### III.2.1.6.1.2 Analyseur électronique d'humidité (Sartorius MA 30)

Pour déterminer la teneur en eau nous avons également utilisé un analyseur électronique d'humidité, le Sartorius MA 30.

#### III.2.1.6.2 Taux d'expansion

##### III.2.1.6.2.1 La masse volumique spécifique

La masse volumique spécifique des fruits et légumes en morceaux déshydratés est mesurée selon une méthode développée au laboratoire LMTAI. Cette méthode consiste à déterminer le volume du produit en utilisant du sable, marin ou désertique, tassé dont la masse volumique est déterminée. En effet, le volume du produit est égale au complément du volume de sable seul nécessaire pour atteindre un volume V identique à celui du système produit + sable tassé mécaniquement à l'aide d'un tapoteur.

$$\text{Équation III-9} \quad \rho_{\text{spécifique}} = \rho_{\text{sable}} \frac{m_{\text{produit}}}{\Delta m}$$

Où  $\Delta m$  est la différence de masse entre un volume  $V$  de sable et la masse du complément de sable versé sur le produit pour atteindre le même volume  $V$ .

#### III.2.1.6.2.2 Le taux d'expansion relatif

Pour déterminer le taux d'expansion relatif des produits solides suite à leurs traitements, nous avons utilisé la formule suivante :

$$\text{Équation III-10} \quad \epsilon_r = \frac{\rho_{\text{spécifique}}^{\text{Produit de référence}}}{\rho_{\text{spécifique}}^{\text{Produit traité}}}$$

#### III.2.1.6.2.3 Le taux d'expansion absolu

Le taux d'expansion absolu est déterminé en fonction de la masse volumique intrinsèque (réelle) du produit :

$$\text{Équation III-11} \quad \epsilon_a = \frac{\rho_{\text{intrinsèque}}^{\text{Produit de référence}}}{\rho_{\text{spécifique}}^{\text{Produit traité}}}$$

#### III.2.1.6.3 Cinétique de séchage

La mesure de l'évolution de la masse des échantillons au cours du séchage nous a permis d'établir les cinétiques de séchage. Les teneurs en eau sont ainsi calculées selon les méthodes définies ci-dessus au paragraphe (IV.3.1)

Plusieurs représentations graphiques possibles des cinétiques de séchage sont utilisées. Dans un premier temps nous avons représenté l'évolution de la teneur en eau au cours du temps ou au cours des cycles DDS ou micro-ondes,  $W=f(t)$  ou  $W=f(n)$ , où  $n$  est le nombre de cycles DDS ou micro-ondes réalisés. Ensuite nous avons tracé l'évolution de la vitesse de séchage,  $-dW/dt$  (la quantité d'eau éliminée par unité de temps (% b.s./s)) ainsi que l'efficacité du séchage (DDS et micro-ondes),  $-dW/dn$  (la quantité d'eau éliminée par cycle(%b.s./cycle)) en fonction de la teneur en eau.  $-\frac{dW}{dt} = f(W)$  ou  $-\frac{dW}{dn} = f(W)$

#### III.2.1.7 Méthode d'analyse expérimentale

Au cours de notre étude, nous avons adopté la méthode des plans d'expériences centraux composites avec cinq niveaux par paramètre pour fixer les conditions

expérimentales du séchage par DDS et pour l'étude des effets mécaniques et thermomécanique. Ce type de plan permet de quantifier les effets quadratiques des paramètres et de tracer les surfaces de réponse en fonction des paramètres opératoires analysés. L'utilisation du logiciel statistique « Statgraphics » a facilité le traitement de ces résultats. Pour les fruits et légumes en morceaux traités, nous avons utilisé un plan complet central composite avec des points en étoiles à 2 paramètres: la pression et le temps de traitement.

### III.2.1.7.1 Composition d'un plan d'expériences

Un plan composite centré se compose de trois parties principales :

- Un plan factoriel complet à deux niveaux (-1) et (+1)
- Des points centraux,
- Des points en étoile.

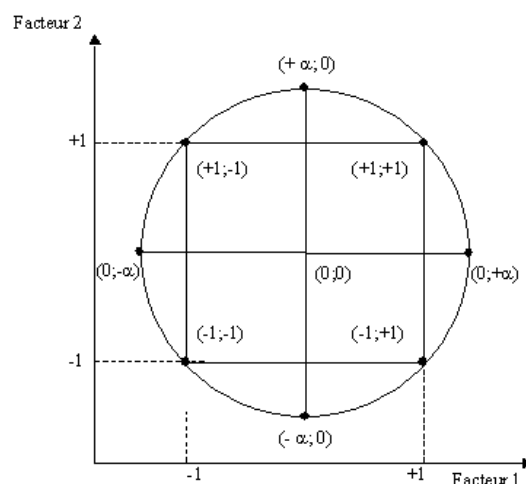


Figure III-16 Les cinq niveaux d'un plan d'expériences à deux facteurs

#### III.2.1.7.1.1 Les points en étoiles

Les points en étoiles axiaux sont des points supplémentaires, notés  $-\alpha$  et  $+\alpha$  par facteur. Ils sont au nombre de  $2k$ . Ils complètent les points axiaux en permettant de définir les effets quadratiques des facteurs. Cette approche permet d'ajuster l'allure de variation de la variable réponse en fonction des paramètres opératoires à l'intérieur du domaine. La valeur de  $\alpha$  est liée au nombre de facteurs  $k$ . La valeur de ces points en étoile est donnée par la formule suivante :

$$\text{Équation III-12} \quad \alpha = \sqrt[4]{2^k}$$

Où k est le nombre de variables, donc  $\alpha = 1,41$  pour 2 variables et 1,68 pour 3 variables.

### III.2.1.7.1.2 Les points centraux

Il s'agit de n répétitions au centre du domaine expérimental. La répétition de ce point est utilisée pour estimer la variance (reproductibilité, répétabilité) des expériences.

Le nombre total de points du plan est donc égal à :  $2^k + 2k + n_0$ ; k étant le nombre de facteurs (variables et  $n_0$  le nombre de répétitions au centre.

Le nombre de niveaux pour chaque paramètre est donc au nombre de cinq ( $-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$ ). Le nombre total d'expériences est donné par l'expression suivante :  $n = 2^k + n_0 + 2k$ , k étant le nombre de paramètres et  $n_0$  le nombre de répétition au centre. Dans notre cas, avec les 2 paramètres opératoires, 11 points expérimentaux ( $2^3 + 3 + (2 \cdot 3)$ ) sont réalisés et étudiés.

### III.2.1.7.1.3 Analyse par Statgraphics

Après avoir réalisé les essais suivant le plan d'expériences, nous avons exploité les résultats à l'aide du logiciel Statgraphics Plus (MANUGISTICS Inc., Rockville, États-Unis). Le logiciel permet l'interprétation des résultats obtenus dans le domaine avec un modèle polynomial d'ordre 1 ou 2 à plusieurs facteurs:

$$\text{Équation III-13} \quad Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{\substack{j=2 \\ j>i}}^n \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

où,

- ✚ Y est la variable réponse mesurée,
- ✚  $\beta$  sont les coefficients de régression,
- ✚ x sont les facteurs (variables opératoires),
- ✚  $\varepsilon$  est l'erreur aléatoire,
- ✚ n est le nombre de facteurs
- ✚ i et j sont les indices des facteurs

#### **III.2.1.7.1.4 Analyse de variance : Tableau ANOVA**

L'analyse de variance nous a permis de tester les effets des différents facteurs et analyser ainsi leurs influences qualifiées de positive ou de négative sur les paramètres réponses. Le tableau ANOVA présente les effets et les compare au modèle en vue de tester sa validité.

#### **III.2.1.7.1.5 Test des différents facteurs**

L'estimation des différents facteurs est effectuée par une analyse de variance où le rapport F (*F-ratio*) s'exprime sous la forme :

$$\text{Équation III-14} \quad F(\text{effet}) = \frac{(\text{somme des carrés des effets}) / n_1}{(\text{somme des carrés des erreurs pures}) / n_2}$$

Où  $n_1$  est le nombre de degré de liberté de l'effet,

$n_2$  est le nombre de degré de liberté de l'erreur pure, F suit alors une loi de Fisher.

Le premier objectif vise à éliminer les paramètres dont l'effet semble « non significatif ». On pose ainsi l'hypothèse que l'effet du paramètre fixé est égal à zéro : c'est l'hypothèse nulle  $H_0$ . *P-value* représente la probabilité d'accepter cette hypothèse. Le risque limite de rejeter  $H_0$  est fixé à 5%.

Si *P-value* est un inférieur à 5%, l'hypothèse  $H_0$  est rejetée. Le paramètre testé est alors significatif et si *P-value* est supérieur à 5%, l'hypothèse  $H_0$  peut être retenue. Le paramètre est donc non significatif.

## **III.2.2 EXPERIMENTATION**

Pour étudier l'effet de la première intensification du séchage par expansion ainsi que l'utilisation de la déshydratation par détentes successives ou des microondes en tant que procédés de deuxième intensification, nous avons mené une série d'expérimentation sur des fruits et légumes en morceaux.

Ces produits en morceaux ont été préalablement pré-séchés jusqu'à leur humidité critique<sup>2</sup>. En réalité, cette humidité dépend de chaque produit.

Les produits utilisés sont les suivants :

- *Pommes en bâtonnets (5x5x30 mm<sup>3</sup>)*
- *Courgettes en rondelles de 5mm d'épaisseur*
- *Oignon en lamelles*
- *Patate douce en tranches de 2 mm d'épaisseur.*

La modélisation des cinétiques de séchage a été effectuée en utilisant les équations que nous avons adoptées au paragraphe §II.2.1.1.1. La pomme en bâtonnet a été assimilée à un cylindre, les courgettes en rondelles et la patate douce en tranches possèdent une géométrie plane et l'oignon en lamelles a été approché par une géométrie sphérique.

### **III.2.2.1 Première intensification du séchage**

Comme nous l'avons indiqué précédemment, la deuxième étape de séchage est gouvernée par la différence de pression partielle de vapeur d'eau au sein de la matière. Le phénomène de retrait, observé lors du séchage des fruits et légumes en morceaux par air chaud, réduit d'une façon considérable la cinétique de séchage. Pour remédier à ce phénomène, l'expansion des produits par la technologie DIC, développée au laboratoire LMTAI, semble être une solution adaptée à ce problème. Cette « première intensification » du séchage améliorera le transfert interne de matière.

Une première série d'expérimentation sur la pomme nous a permis d'étudier les effets mécanique et thermomécanique ainsi que l'effet de la vitesse de la détente (l'instantanéité) sur le taux d'expansion.

Ensuite, nous avons étudié, sur les différents produits considérés, l'influence des paramètres opératoires sur le taux d'expansion et par conséquent sur les cinétiques de séchage par air chaud.

---

<sup>2</sup> C'est l'humidité en dessous de laquelle le séchage est gouverné par la différence de pression partielle de vapeur

### III.2.2.1.1 Effets mécanique et thermomécanique:

L'analyse des effets mécanique et thermomécanique de la DIC sur l'expansion des fruits et légumes en morceaux a été réalisée à travers une approche par la méthode des plans d'expériences.

Cette méthode est constituée d'un plan composite central à cinq niveaux avec trois répétitions au centre. Les paramètres étudiés sont la pression de la vapeur d'eau (DIC-VAP : Effet Thermomécanique) la pression d'air (DIC-AIR : Effet mécanique) et le temps de traitement. Ces expériences ont été réalisées sur la pomme.

Les limites de variation des paramètres opératoires sont décrites dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-2 Paramètres opératoires : Effets Thermomécanique et Mécanique

Traitement DIC-VAP et DIC-AIR					
Paramètres	- $\alpha$	--1	0	+1	+ $\alpha$
Pression P(bars)	1	2	4	6	7
Temps t (s)	10	12	15	18	20

Notons que dans le cas du traitement DIC-VAP, la température du milieu ambiant peut être déterminée à partir de la pression de vapeur d'eau saturée :

Tableau III-3 Paramètres opératoires : Effets Thermomécanique (Température)

Traitement DIC-VAP					
Paramètres	- $\alpha$	-1	0	+1	+ $\alpha$
Pression P (bars)	1	2	4	6	7
Température (T en °C)	100	120	144	159	165

L'ensemble de ces traitements a été suivi d'un séchage par air chaud à 30 °C jusqu'à obtenir une humidité finale inférieure à 7%.



La masse volumique des produits finaux a été ensuite mesurée et le taux d'expansion calculé. Ce calcul a été fait par rapport à la matière première (Pomme pré-séchée) séchée dans les mêmes conditions mais sans traitement DIC. La masse volumique réelle (intrinsèque) de la pomme a également été mesurée, elle est égale à :  $\rho_r=1458 \text{ kg/m}^3$ .

Les résultats des expériences réalisées selon les plans d'expériences sont réunis sur l'ensemble des figures ci-dessous. Il s'agit des courbes de tendances (effets principaux), de la surface de réponse et, finalement de l'histogramme de Pareto. Ce dernier permet d'appréhender très aisément, les paramètres ayant un impact important à travers les termes d'effets simples, d'effets quadratiques et d'interaction, ainsi que les paramètres à impact négligeable. Une présentation plus synthétique, sous forme d'expressions faisant intervenir les termes linéaires, quadratiques et d'interaction a également été considérée.

### III.2.2.1.2 Résultats du traitement thermomécanique (DIC-VAP)

Les résultats obtenus lors du traitement DIC-VAP sont décrits dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-4 Résultats effet thermomécanique

Effet Thermo-Mécanique					
	P (b)	t (s)	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$\epsilon$	$\epsilon_{\text{abs}}$
RM	-	-	551	1	2,69
VAP1	4,0	10,0	283	1,95	5,24
VAP2	4,0	15,0	257	2,15	5,77
VAP3	1,9	11,5	277	1,99	5,34
VAP4	6,1	18,5	261	2,11	5,68
VAP5	6,1	11,5	316	1,75	4,70
VAP6	7,0	15,0	255	2,17	5,82
VAP7	4,0	15,0	286	1,93	5,19
VAP8	4,0	15,0	251	2,20	5,91
VAP9	1,0	15,0	431	1,28	3,44
VAP10	1,9	18,5	296	1,86	5,01
VAP11	4,0	20,0	263	2,10	5,64

Ces résultats montrent bien l'effet de la pression de vapeur et du temps de traitement sur le taux d'expansion de la pomme. Un taux d'expansion maximum de 2,2 est mesuré

pour un traitement à 400 kPa pendant 15 s. En analysant le diagramme de Pareto, nous remarquons que la pression de vapeur et par conséquent la température instaurée dans l'enceinte ont un effet important sur le taux d'expansion.

Les analyses obtenues par Statgraphics sont représentées ci-dessous :

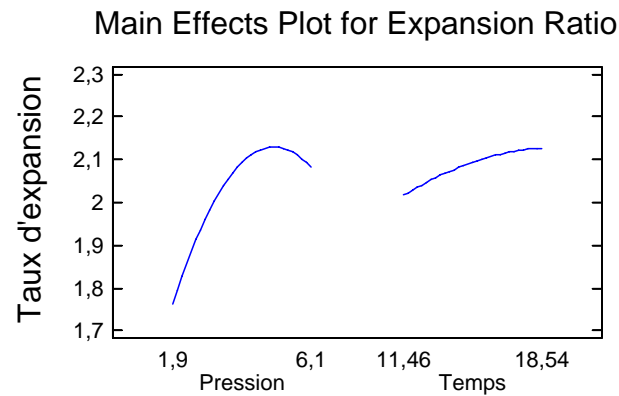


Figure III-17 Les effets de la pression et du temps de traitement sur le taux d'expansion

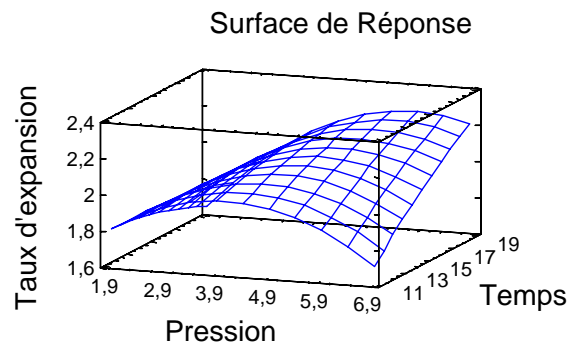


Figure III-18 Variation du taux d'expansion de la pomme en fonction de la pression et du temps de traitement

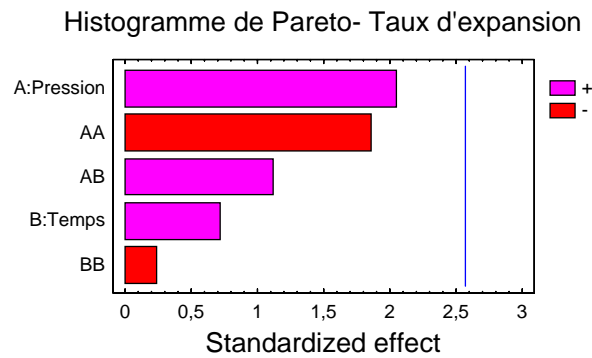


Figure III-19 Histogramme de Pareto

L'expression du taux d'expansion de la pomme en fonction de la pression et du temps de traitement peut être écrite sous la forme :

$$\varepsilon = 1,54731 + 0,136187 * P + 0,00068839 * t - 0,0388341 * P^2 + 0,0166667 * P * t - 0,0017216 * t^2$$

### III.2.2.1.3 Résultats du traitement mécanique (DIC- AIR)

Les résultats des expériences réalisées par un traitement DIC-AIR sont dressés dans le tableau suivant :

Tableau III-5 Résultats traitement mécanique

Effet Mécanique					
RM	P (b)	t (s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\varepsilon$	$\varepsilon_{abs}$
RM	-	-	551	1	2,69
AIR1	4,0	10,0	567	0,97	2,62
AIR2	4,0	15,0	558	0,99	2,66
AIR3	1,9	11,5	528	1,04	2,81
AIR4	6,1	18,5	519	1,06	2,85
AIR5	6,1	11,5	554	1,00	2,68
AIR6	7,0	15,0	509	1,08	2,91
AIR7	4,0	15,0	541	1,02	2,74
AIR8	4,0	15,0	515	1,07	2,88
AIR9	1,0	15,0	467	1,18	3,18
AIR10	1,9	18,5	551	1,00	2,69
AIR11	4,0	20,0	508	1,09	2,92

Ces résultats montrent que le traitement mécanique seul n'a aucun effet significatif sur l'expansion des produits. Le taux d'expansion obtenu pour les 11 points du plan d'expériences était de  $1 \pm 0,07$ .

L'analyse de ces résultats par Statgraphics nous a permis de voir que ni la pression d'air ni le temps de traitement n'ont un effet sur l'expansion de la pomme. Les graphiques sont présentés ci-dessous :

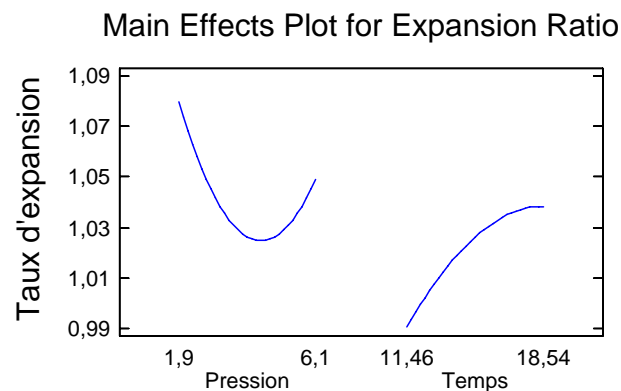


Figure III-20 Les effets de la pression et du temps de traitement sur le taux d'expansion

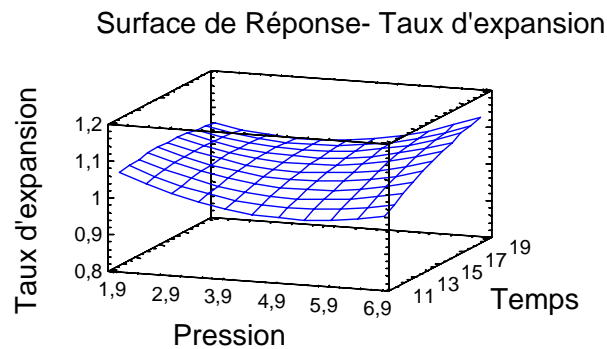


Figure III-21 Variation du taux d'expansion de la pomme en fonction de la pression initiale et du temps de traitement

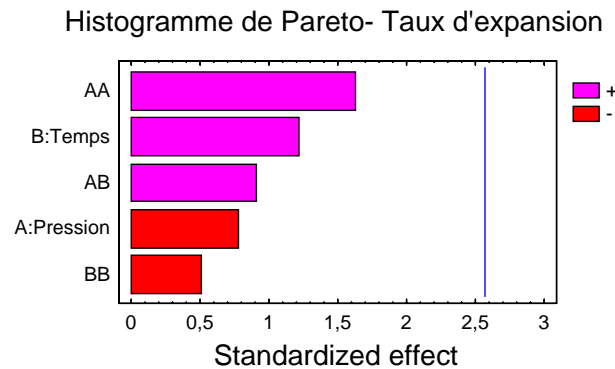


Figure III-22 Histogramme de Pareto

Nous remarquons que l'effet mécanique seul ne permet pas l'expansion de la pomme. En effet la masse volumique est restée quasiment constante, indépendante des conditions de traitement.

#### III.2.2.1.3.1 Conclusion

Dans le cas du traitement thermomécanique par DIC, l'expansion est liée à l'autovaporisation d'une partie de l'eau du produit suite à la détente instantanée vers le vide à partir d'un état initial de haute température- haute pression. Cette détente instantanée est accompagnée d'une chute importante de la température ( $\Delta S \rightarrow 0$ ), une génération d'une quantité importante de vapeur et par conséquent de l'expansion du produit.

Lors du traitement mécanique par DIC, l'air sous pression est détendu instantanément vers le vide provoquant une « expansion » du produit sous le seul effet mécanique. Etant données les faibles variations de température et d'humidité du produit, la limite de la transition vitreuse ne sera pas franchie et le produit, grâce à son comportement rhéologique, reprend alors sa forme initiale.

#### III.2.2.2 Effet de la non-instantanéité

L'analyse de l'effet thermomécanique par Statgraphics nous a permis d'optimiser nos expériences et de trouver les paramètres pour lesquelles nous pourrions obtenir une expansion maximale. Les conditions opératoires optimums d'après Statgraphics sont les

suivants : Pression= 600 kPa et temps= 20 s. Ces conditions ont été utilisées pour étudier l'effet de la non-instantanéité (vitesse de détente) sur l'expansion.

Pour cela nous avons utilisé l'ensemble des diaphragmes décrits dans le paragraphe § III.2.1.1.1.3. Les produits ont été ensuite séchés à l'air chaud à 45°C jusqu'à obtenir une humidité finale inférieure à 7%. La masse volumique des produits a été mesurée et leurs taux d'expansion relatif et absolue calculés. L'évolution de la masse de ces produits a également été suivie pendant 2 heures et les cinétiques de séchage tracées.

Les cinétiques de séchage par air chaud à 45°C sont présentées sur le graphique ci-dessous :

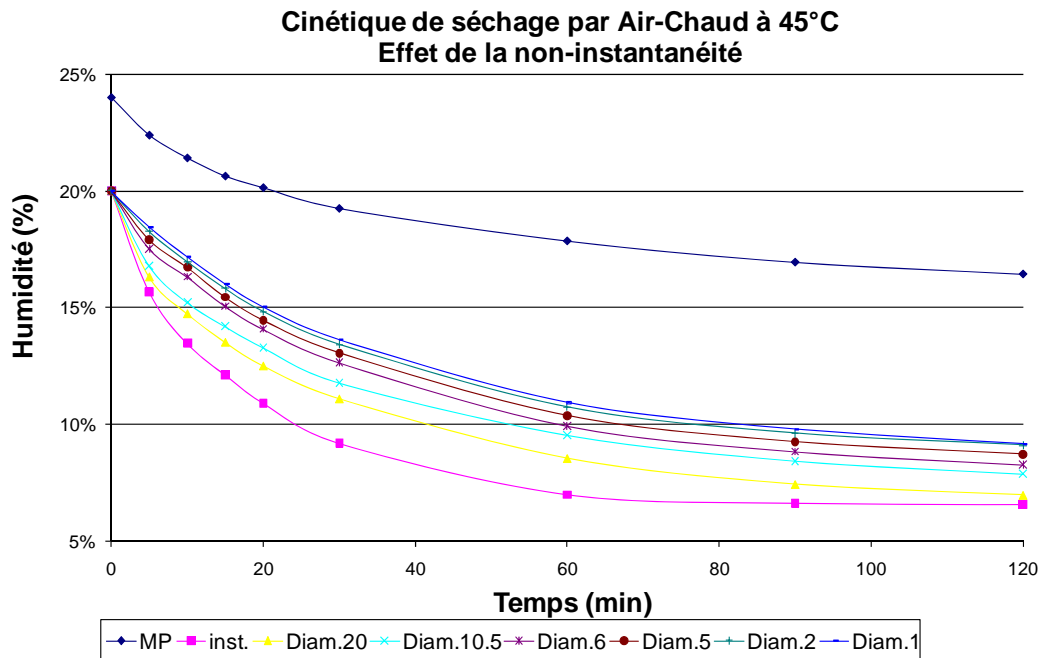


Figure III-23 Cinétique de séchage de la pomme par air chaud à 45°C : Effet de la non-instantanéité

Les résultats concernant la diffusivité effective lors du séchage par air chaud ainsi que les taux d'expansion obtenus sont ainsi regroupés dans le tableau suivant :

Tableau III-6 Effet de la vitesse de détente

<b>Non Instantanéité DIC -AC 45°C</b>
---------------------------------------

Diam	$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)	$\xi$	$\varepsilon$	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\varepsilon_{abs}$
0 (MP)	2,27E-10	1,00	1,00	471,8	3,1
1	4,52E-10	2,00	1,16	407,5	3,6
2	4,58E-10	2,02	1,17	403,0	3,7
5	4,89E-10	2,16	1,29	366,5	4,0
6	5,28E-10	2,33	1,31	358,8	4,1
10,5	5,51E-10	2,43	1,58	298,9	5,0
20	6,89E-10	3,04	1,91	247,6	6,0
200	1,36E-09	6,00	1,98	237,7	6,2

Nous avons également défini un taux de diffusion noté  $\xi$  qui représente le ratio entre la diffusivité effective d'un produit « i » et la diffusivité effective de la matière première séchée dans les mêmes conditions mais sans traitement DIC :

$$\text{Équation III-15} \quad \xi = \frac{D_{eff_i}}{D_{eff_{MP}}}$$

Ces résultats montrent clairement l'effet de la vitesse de détente vers le vide (l'instantanéité) sur l'expansion des produits. En effet plus la détente est abrupte et plus le taux d'expansion est élevé et plus la diffusivité effective est importante. A titre d'exemple, le taux de diffusion lors d'une détente instantanée est 3 fois supérieur à celui obtenu lors d'une détente avec un diaphragme de 1 mm.

Donc, quand la détente vers le vide devient de plus en plus lente (Détente quasi-statique) les propriétés du produit tendent vers celles du produit non traité.

### III.2.2.2.1 Explication par la théorie de l'instantanéité

En se basant sur la théorie de l'instantanéité, le phénomène d'expansion peut être interprété de la manière suivante :

La quantité de vapeur générée par autovaporisation d'une partie de l'eau engendre des contraintes mécaniques au sein même du produit induisant son expansion.

En effet, un processus de génération d'entropie accompagne l'évolution du système vers son nouvel état d'équilibre ; l'instantanéité de la détente implique le passage obligatoire par un état intermédiaire de non-équilibre caractérisé par une génération d'entropie totale nulle. La quantité de vapeur générée lors de la détente dépend de la température initiale du produit, de la température d'équilibre à la pression finale et de la vitesse de la détente.

La détente instantanée induit une chute brutale de température en dessous de celle de l'équilibre définie par la pression finale (génération d'entropie négative) qui vient s'opposer à la variation abrupte de pression (entropie générée positive) de telle sorte que l'entropie totale générée soit nulle (approche asymptotique,  $\Delta S_P + \Delta S_T \rightarrow 0$ ). Cette baisse de température conduit à une génération importante de vapeur et une expansion immédiate et maximale du produit.

La modification de la structure (expansion, alvéolation,...) du produit dépend de ses caractéristiques hydro-thermo-rhéologiques. Il est important de noter que la température de transition vitreuse des produits a un impact important sur la rigidification de la forme expansée. Le traitement par détente instantanée contrôlée induit une diminution de la teneur en eau du produit, par autovaporisation, et de sa température par refroidissement lié à l'autovaporisation ; le produit traverse donc la frontière de la transition vitreuse.

Il est important de noter que ce passage « instantané » dans la zone de transition vitreuse n'est pas accompagné d'une rigidification immédiate des produits. En effet, la matière nécessite un certain temps ( $\Delta t_{org}$ ) avant de s'organiser et vu « l'instantanéité » du processus, elle maintient ses propriétés hydro-thermo-rhéologiques de haute température (phénomène de trempe). Le taux d'expansion atteint ainsi une valeur maximale avant de diminuer et cela grâce aux propriétés rhéologiques du produit. La structure se trouve rigidifiée après une durée  $\Delta t_{org}$ .



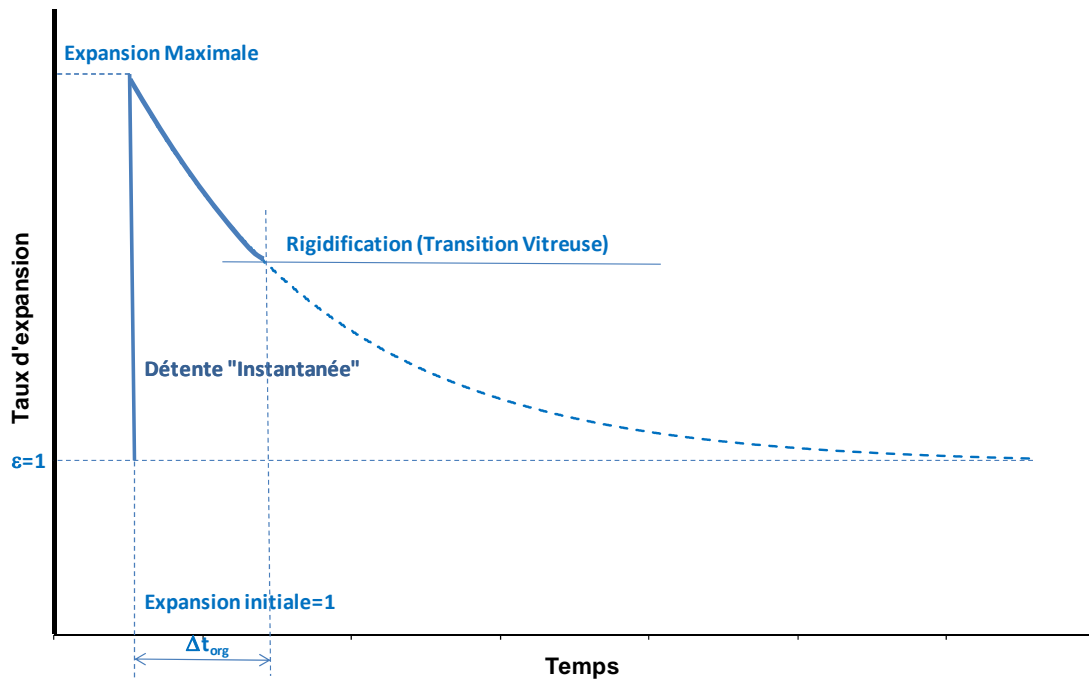


Figure III-24 Variation du taux d'expansion des produits suite au traitement DIC

### III.2.2.3 Cinétiques de séchage

Au cours de la deuxième phase de séchage, la vitesse de déshydratation n'est plus constante, elle décroît, traduisant ainsi le fait que l'eau ne migre plus en débit suffisant pour maintenir la surface à la même teneur en eau. La vitesse de séchage dépend de l'air mais surtout des caractéristiques propres du produit. Quand la totalité de la matière atteint le niveau hygroscopique ; la migration de l'eau a lieu sous forme vapeur et le taux d'énergie nécessaire à l'élimination d'une unité d'eau est relativement élevé et surtout suite au phénomène de retrait qui réduit la taille des pores et des alvéoles.

Cette série d'expériences a été réalisée sur les quatre produits (pomme, oignon, patate douce et courgette) afin de valider l'importance de l'utilisation de la DIC en tant que procédé de première intensification du séchage.

L'évolution de la masse des produits au cours de la déshydratation par air chaud à 30°C, 45°C et 60 °C a été suivie, et nous avons ainsi déterminé les cinétiques de séchage. Trois répétitions ont été menées sur chaque échantillon afin de limiter l'hétérogénéité du

séchage le long des plateaux. Chaque produit a subi deux traitements DIC différents et leurs cinétiques ont été comparées à celles de la matière première non traitée.

Les conditions de traitement par DIC de chacun des produits sont décrites dans les tableaux suivants :

*Tableau III-7 Conditions opératoires de traitement DIC*

	Pomme	Courgette	Oignon	Patate Douce
Humidité initiale	24%	15%	17%	11%
DIC 1	500 kPa, 10 s	400 kPa, 10 s	500 kPa, 5 s	400 kPa, 16 s
DIC 2	400 kPa, 10 s	300 kPa, 10 s	400 kPa, 5 s	400 kPa, 20 s
Humidité après DIC (1 &2)	20%	15%	16%	12%

### **III.2.2.3.1 Résultats**

Il apparaît clairement que par comparaison avec la matière première non traitée par DIC, les produits qui ont subi le traitement DIC ont une vitesse de déshydratation relativement élevée. Par exemple, à 45 °C, la pomme traitée suivant les conditions DIC 1 atteint, au bout de deux heures, une humidité finale de 6,5% alors que la matière première n'atteint que 16% ! La durée de séchage se trouve ainsi considérablement réduite tout en ayant une haute qualité texturale et organoleptique du produit fini. Cette amélioration de l'aptitude technologique au séchage par l'intermédiaire de la première intensification par expansion reste valable pour d'autres conditions de séchage.

L'ensemble des graphiques des cinétiques de séchage des quatre produits sont présentés en Annexe E.

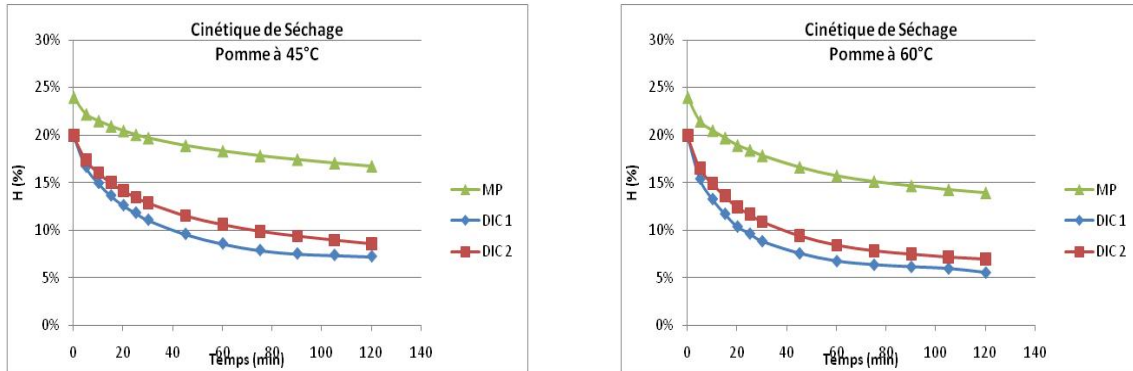


Figure III-25 Cinétiques de séchage de la pomme en bâtonnet

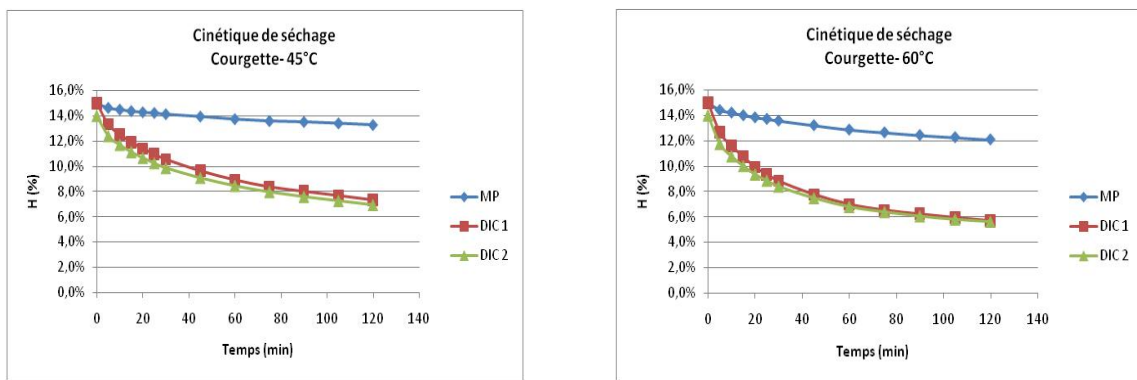


Figure III-26 Cinétiques de séchage des courgettes en rondelles

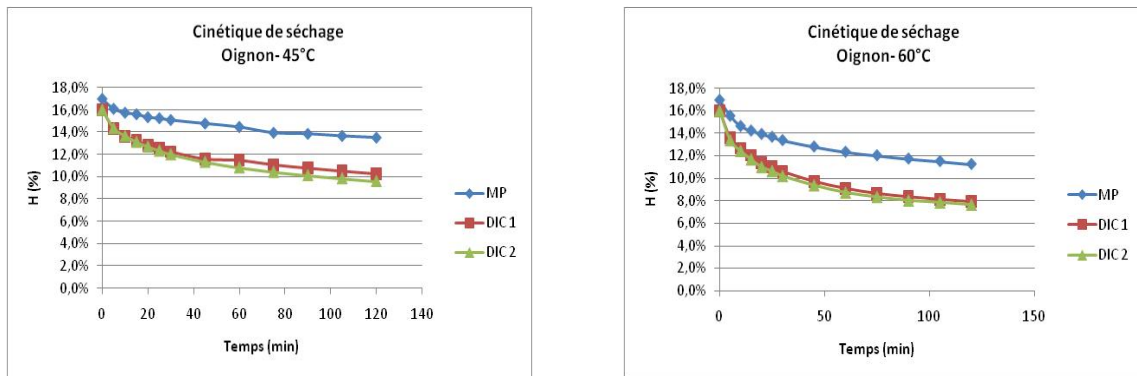


Figure III-27 Cinétiques de séchage de l'oignon en lamelles

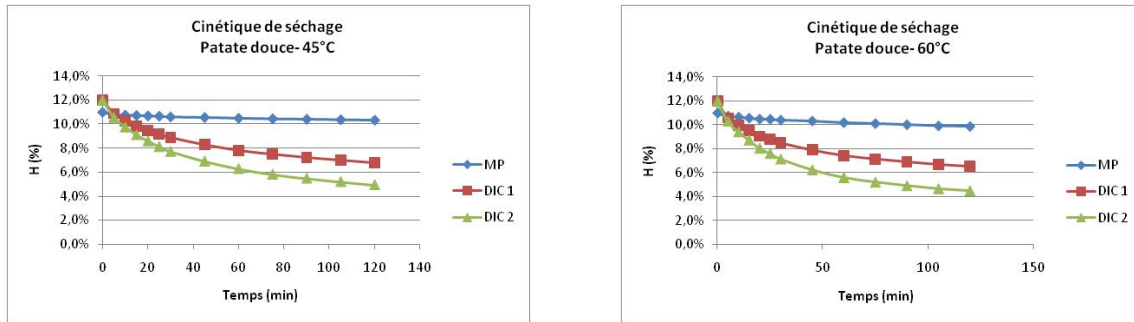


Figure III-28 Cinétiques de séchage de la patate douce en tranche

### III.2.2.3.1.1 Résultats issus du modèle

À partir de la courbe du taux d'humidité  $H=f(t)$ , nous avons déterminé la valeur de l'humidité réduite  $H_r$  qui est donnée par  $H_r = \frac{\tilde{H} - H_{eq}}{H_{ini} - H_{eq}}$ . Nous avons ensuite déterminé la valeur de la diffusivité effective lors du séchage en utilisant les modèles adoptés et présentés ci-dessous.

Pour la pomme (géométrie cylindrique) :

$$H - H_{eq} H_{init} - H_{eq} = -5,783 D_{eff} t R_c^2$$

Pour l'oignon (géométrie sphérique) :

$$\text{Équation II-56} \quad \ln(H_r) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) + \frac{-D_{eff} n^2 \pi^2 t}{R_c^2}$$

Pour les courgettes et la patate douce (géométrie plane) :

$$\text{Équation II-59} \quad \frac{H(r) - H_{eq}}{H_{init} - H_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} e^{\left(\frac{-D_{eff} \pi^2 t}{l^2}\right)} + \dots$$

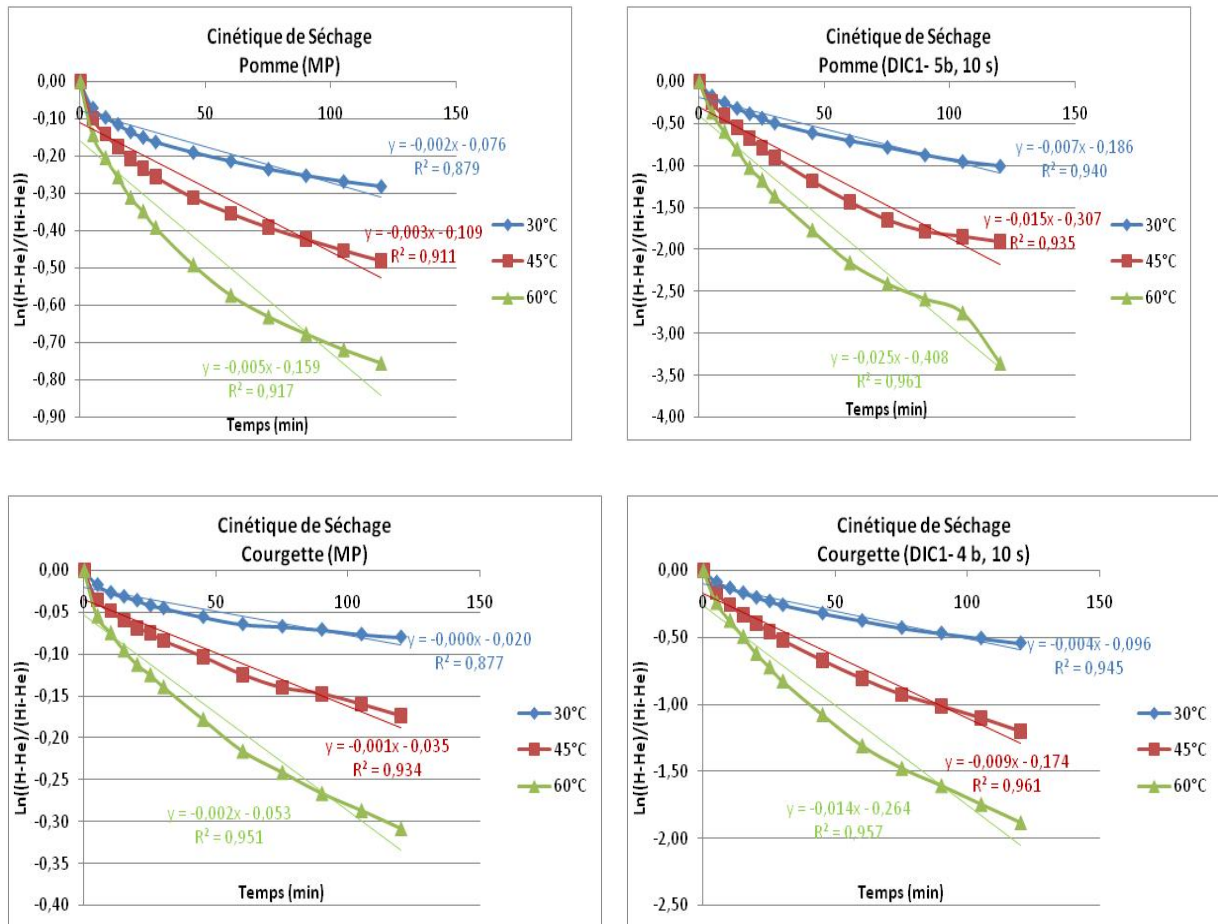


Figure III-29 Exemples de cinétique de séchage des différents fruits et légumes en morceaux selon les modèles adoptés

Pour comparer les diffusivités des produits traités par DIC et celles des produits non traités, nous avons dressé les tableaux récapitulatifs suivants regroupant la diffusivité effective (déterminée à partir des modèles déjà définis), le taux de diffusivité  $\xi$  représentant le rapport entre la diffusivité effective du produit et celle de la matière première à la même température, le taux d'expansion et l'humidité finale:

Tableau III-8 Pomme : résultats première intensification du séchage

Séchage AC- Pomme												
	$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)			$\xi$			$\epsilon$			H		
	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2
30°C	1,41E-10	5,45E-10	3,86E-10	1,00	3,88	2,75	1,00	1,90	1,61	17,7%	8,7%	10,3%
45°C	5,65E-10	2,09E-09	1,48E-09	1,00	3,69	2,63	1,00	1,96	1,82	15,1%	5,3%	6,7%
60°C	4,10E-10	1,81E-09	1,18E-09	1,00	4,40	2,86	1,00	1,67	1,69	12,1%	4,0%	5,6%

Tableau III-9 Oignon : résultats première intensification du séchage

Séchage AC- Oignon												
	$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)			$\xi$			$\varepsilon$			H		
	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2
30°C	3,83E-11	1,11E-10	1,55E-10	1,00	2,90	4,04	1,00	1,75	1,47	13,9%	10,7%	9,8%
45°C	9,64E-11	1,92E-10	2,49E-10	1,00	1,99	2,58	1,00	1,63	1,87	11,9%	8,4%	7,9%
60°C	1,76E-10	3,87E-10	4,10E-10	1,00	2,19	2,32	1,00	1,74	2,01	9,4%	6,0%	5,7%

Tableau III-10 Patate douce : résultats première intensification du séchage

Séchage AC- Patate Douce												
	$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)			$\xi$			$\varepsilon$			H		
	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2
30°C	1,34E-11	1,69E-10	3,41E-10	1,00	12,54	25,40	1,00	5,10	3,17	17,3%	8,6%	7,1%
45°C	2,48E-11	3,20E-10	6,96E-10	1,00	12,92	28,07	1,00	5,80	3,18	16,3%	5,4%	5,2%
60°C	4,97E-11	3,40E-10	9,35E-10	1,00	6,85	18,84	1,00	3,71	2,08	15,1%	5,0%	4,8%

Tableau III-11 Courgettes : résultats première intensification du séchage

Séchage AC- Courgette												
	$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)			$\xi$			$\varepsilon$			H		
	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2
360	2,16E-11	1,63E-10	2,01E-10	1,00	7,52	9,30	1,00	5,10	3,17	17,3%	8,6%	7,1%
45°C	4,92E-11	3,72E-10	3,76E-10	1,00	7,57	7,66	1,00	5,80	3,18	16,3%	5,4%	5,2%
60°C	9,24E-11	5,96E-10	5,75E-10	1,00	6,45	6,22	1,00	3,71	2,08	15,1%	5,0%	4,8%

Le traitement DIC augmente considérablement la diffusivité effective des différents produits lors du séchage par air chaud. Cette diffusivité s'est retrouvée multipliée par des facteurs allant de 2 à 10 !

Notons enfin que les valeurs de la diffusivité effective obtenues sont du même ordre de grandeur que celles trouvées dans la bibliographie (diffusivité des produits alimentaires varie entre  $10^{-11}$  et  $10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s)

### III.2.3 CONCLUSION

En tout premier lieu, nous avons validé l'utilisation de la DIC en tant que premier moyen d'intensification du séchage. En effet, la nouvelle structure expansée des produits a un impact direct sur les propriétés diffusionnelles de la matière. La durée nécessaire pour atteindre un niveau d'humidité inférieure à 7-8% semble être inférieure à deux heures,

elle est ainsi réduite de 2 à 6 fois par rapport à celle des produits non traités avec une meilleure qualité du produit fini.

### **III.2.3.1 Deuxième intensification du séchage**

Le paradoxe présenté dans le Paragraphe §II.2.3 intervient d'une façon accentuée lors du séchage des produits expansés par DIC et cela à cause de la diminution de la conductivité thermique qui rend le transfert interne de chaleur comme facteur limitant et qui augmente par conséquent le degré d'opposition entre le gradient de pression et le gradient de température. Dans cette partie, nous étudierons l'utilisation de la Déshydratation par Détentes Successives (DDS) et des microondes comme un moyen de deuxième intensification pour remédier à l'étape paradoxale.

#### **III.2.3.1.1 La déshydratation par détentes successives (DDS)**

Les expérimentations de séchage par DDS ont été conduites selon des plans d'expériences classiques. Nous avons réalisé les essais en considérant deux valeurs pour la pression basse, la pression atmosphérique (DDS-ATM) et le vide (5 kPa) (DDS-VAC).

Pour le traitement vers la pression atmosphérique (DDS-ATM) la durée de maintien à basse pression n'a pas d'influence sur la cinétique de séchage, pour cela nous lui avons fixé une valeur constante de 5 s. Les paramètres opératoires sont ainsi la pression haute  $P_h$  et le temps du palier haut  $t_h$ .

Le séchage par DDS a été réalisé sur trois échantillons de chaque produit ; la matière première pré-séchée(MP) et la matière première ayant subi deux traitements DIC suivant deux conditions opératoires différentes (DIC1 et DIC2). Chaque échantillon a subi une série de 60 cycles de séchage par DDS. La variation de la masse quant à elle, a été mesurée tous les 20 cycles.

Le plan d'expériences utilisé est un plan à 2 variables avec cinq niveaux. Les limites des conditions opératoires sont ainsi dressées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-12 Conditions opératoires de traitement DDS vers la pression atmosphérique

DDS-ATM	$-\alpha$	-1	0	1	2
Pression haute $P_h$	2	2,6	4	5,4	6
Temps palier haut $t_h$	4	9	20	31	36

L'ensemble des conditions opératoires sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau III-13 Plan d'expériences DDS-ATM

DDS-ATM	$P_h$ (bar)	$P_b$ (bar)	$t_h$ (s)	$t_b$ (s)
1	4	1	20	5
2	4	1	20	5
3	4	1	20	5
4	6	1	20	5
5	2,6	1	9	5
6	4	1	36	5
7	5,4	1	9	5
8	4	1	20	5
9	2	1	20	5
10	5,4	1	31	5
11	2,6	1	31	5

Pour le traitement vers le vide (DDS-VAC), les variables opératoires sont la pression haute  $P_h$ , le temps du palier haut  $t_h$  ainsi que le temps du palier bas  $t_b$ . Nous avons considéré une approche linéaire basée sur l'ensemble des expériences déjà menées au laboratoire, l'ensemble des conditions opératoires sont présentées ci-dessous :

Tableau III-14 Conditions opératoires DDS-VAC

DDS-VAC	$P_h$ (bar)	$P_b$ (bar)	$t_h$ (s)	$t_b$ (s)
1	2	0,05	11	11
2	3	0,05	11	11
3	5	0,05	11	11



4	6	0,05	11	11
5	2	0,05	29	11
6	5	0,05	29	11
7	6	0,05	29	11
8	2	0,05	29	29
9	3	0,05	29	29
10	6	0,05	29	29
11	5	0,05	11	29
12	6	0,05	11	29

Un diaphragme de 1 mm de diamètre a également été utilisé afin d'étudier l'effet de la vitesse de détente (l'instantanéité) sur le séchage par DDS (DDS-ATM Non-Inst et DDS-VAC Non-Inst)

### III.2.3.1.1.1 Résultats

La cinétique de séchage par DDS est analysée à partir des courbes donnant l'évolution de l'humidité en fonction du temps.. Un tableau présentant les conditions opératoires et les paramètres de réponse (la vitesse de séchage par DDS  $\omega$  (kg.s<sup>-1</sup>) (Équation II-72) et l'efficacité de séchage par cycle de DDS  $\Omega$ (kg.cycle<sup>-1</sup>) (Équation II-73) a été dressée pour chacun des cas considérés. Les courbes de variation de l'humidité H (base humide) en fonction du temps sont ainsi réalisées.

Tableau III-15 Résultats du traitement de la pomme par DDS vers la pression atmosphérique (DDS-ATM)

POMME					$\omega$ (kg.s <sup>-1</sup> )			$\Omega$ ( kg.cycle <sup>-1</sup> )		
DDS-ATM	P <sub>h</sub> (bar)	P <sub>b</sub> (bar)	t <sub>h</sub> (s)	t <sub>b</sub> (s)	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2
1	4	1	20	5	1,2E-05	2,2E-05	2,3E-05	3,0E-04	5,4E-04	5,8E-04
2	4	1	4	5	3,3E-05	5,0E-05	4,4E-05	8,2E-04	1,3E-03	1,1E-03
3	4	1	20	5	1,5E-05	1,8E-05	1,7E-05	3,7E-04	4,6E-04	4,3E-04
4	6	1	20	5	1,9E-05	3,1E-05	2,7E-05	4,7E-04	7,8E-04	6,7E-04
5	2,6	1	9	5	2,4E-05	3,1E-05	3,6E-05	3,3E-04	4,4E-04	5,0E-04
6	4	1	36	5	8,9E-06	1,7E-05	1,4E-05	3,6E-04	6,8E-04	5,9E-04
7	5,4	1	9	5	3,1E-05	4,9E-05	4,5E-05	4,4E-04	6,8E-04	6,3E-04
8	4	1	20	5	1,6E-05	2,4E-05	2,1E-05	3,9E-04	6,1E-04	5,2E-04
9	2	1	20	5	1,1E-05	1,5E-05	1,3E-05	2,7E-04	3,7E-04	3,4E-04
10	5,4	1	31	5	1,3E-05	1,6E-05	1,8E-05	4,6E-04	5,8E-04	6,3E-04
11	2,6	1	31	5	9,5E-06	1,2E-05	9,2E-06	3,4E-04	4,2E-04	3,3E-04

Tableau III-16 Résultats du traitement de l'oignon par DDS vers la pression atmosphérique

OIGNON					$\omega$ (kg.s <sup>-1</sup> )			$\Omega$ (kg.cycle <sup>-1</sup> )		
DDS-ATM	P <sub>h</sub> (b)	P <sub>b</sub> (b)	t <sub>h</sub> (s)	t <sub>b</sub> (s)	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2
1	4	1	20	5	3,4E-06	2,9E-05	1,1E-05	8,6E-05	7,2E-04	2,8E-04
2	6	1	20	5	1,7E-05	6,7E-05	4,0E-05	4,2E-04	1,7E-03	1,0E-03
3	2,6	1	9	5	4,1E-06	8,7E-06	1,7E-05	5,7E-05	1,2E-04	2,4E-04
4	5,4	1	9	5	6,1E-06	3,2E-05	1,6E-05	8,5E-05	4,5E-04	2,3E-04
6	2	1	20	5	3,1E-06	1,0E-05	6,6E-06	7,7E-05	2,5E-04	1,7E-04
7	6	1	20	5	2,5E-06	8,3E-06	4,4E-06	6,3E-05	2,1E-04	1,1E-04
8	6	1	4	5	1,4E-05	3,5E-05	1,2E-05	1,2E-04	3,1E-04	1,1E-04

Tableau III-17 Résultats du traitement de la pomme vers le vide par DDS (DDS-VAC)

POMME					$\omega$ (kg.s <sup>-1</sup> )			$\Omega$ ( kg.cycle <sup>-1</sup> )		
DDS-VAC	P <sub>h</sub> (b)	P <sub>b</sub> (b)	t <sub>h</sub> (s)	t <sub>b</sub> (s)	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2
1	2	0,05	11	11	2,0E-05	4,3E-05	3,1E-05	4,4E-04	9,5E-04	6,8E-04
2	3	0,05	11	11	3,9E-05	9,0E-05	6,7E-05	8,5E-04	2,0E-03	1,5E-03
3	5	0,05	11	11	3,9E-05	6,2E-05	5,2E-05	8,6E-04	1,4E-03	1,1E-03
4	6	0,05	11	11	3,3E-05	9,2E-05	6,6E-05	7,4E-04	2,0E-03	1,4E-03
5	2	0,05	29	11	1,4E-05	2,6E-05	2,4E-05	5,5E-04	1,0E-03	9,5E-04
6	5	0,05	29	11	1,7E-05	3,5E-05	2,7E-05	6,8E-04	1,4E-03	1,1E-03
7	6	0,05	29	11	2,5E-05	5,4E-05	4,3E-05	1,0E-03	2,2E-03	1,7E-03
8	2	0,05	29	29	1,2E-05	2,7E-05	2,3E-05	6,8E-04	1,6E-03	1,3E-03
9	3	0,05	29	29	1,5E-05	3,7E-05	3,5E-05	8,9E-04	2,1E-03	2,0E-03
10	6	0,05	29	29	1,7E-05	3,9E-05	3,5E-05	1,0E-03	2,3E-03	2,0E-03
11	5	0,05	11	29	2,2E-05	4,8E-05	4,7E-05	8,6E-04	1,9E-03	1,9E-03
12	6	0,05	11	29	2,9E-05	5,9E-05	5,0E-05	1,1E-03	2,3E-03	2,0E-03

Tableau III-18 Résultats du traitement de l'oignon par DDS vers le vide (DDS-VAC)

OIGNON					$\omega$ (kg.s <sup>-1</sup> )			$\Omega$ (kg.cycle <sup>-1</sup> )		
DDS-VAC	P <sub>h</sub> (bar)	P <sub>b</sub> (bar)	t <sub>h</sub> (s)	t <sub>b</sub> (s)	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2
1	2	0,05	11	11	1,1E-05	1,3E-05	1,2E-05	2,3E-04	2,8E-04	2,6E-04

2	5	0,05	11	11	1,6E-05	3,2E-05	2,4E-05	3,5E-04	7,1E-04	5,2E-04
3	2	0,05	29	11	2,2E-05	2,7E-05	3,2E-05	8,7E-04	1,1E-03	1,3E-03
4	5	0,05	29	11	4,3E-05	6,5E-05	2,7E-05	1,7E-03	2,6E-03	1,1E-03
5	2	0,05	29	29	4,8E-06	1,1E-05	1,1E-05	2,8E-04	6,4E-04	6,3E-04
6	5	0,05	11	29	1,1E-05	2,1E-05	1,8E-05	4,4E-04	8,3E-04	7,1E-04

Une première observation montre que la première intensification par expansion améliore considérablement le séchage par DDS. Ainsi pour le traitement DIC 1 l'efficacité de séchage par cycle se trouve multiplié par un facteur supérieur à 1,3 lors de la DDS vers la pression atmosphérique (DDS-ATM) et supérieur à 2 dans la majorité des expérimentations vers le vide (DDS-VAC)

Nous avons remarqué lors de ces expérimentations l'importance du ratio de détente entre le niveau haut de pression et le niveau bas. En effet plus le ratio de détente est important et plus la quantité d'eau éliminée est importante. A titre d'exemple, le traitement de la pomme montre une vitesse maximale de  $4,9.10^{-5}$  kg. s<sup>-1</sup> pour un ratio de 5,4 (DIC1, P<sub>h</sub>=5,4b, P<sub>b</sub>=1 b, t<sub>h</sub>=20 s) et de  $9,20.10^{-5}$  kg.s-1 pour un ratio de 120 (DIC1, P<sub>h</sub>=6b, P<sub>b</sub>=0,05 b, t<sub>h</sub>=11 s, t<sub>b</sub>= 11 s).

Lors du séchage par DDS vers le vide, la variation de la durée du palier bas ne présentait pas un effet significatif sur l'efficacité du séchage par cycle, confirmant ainsi les hypothèses concernant la DDS (Voir Paragraphe § II.2.4.1.1.1)

#### III.2.3.1.1.1.1 Effet de l'instantanéité

Nous avons également mené des expériences afin d'étudier l'effet de la vitesse de la détente sur l'autovaporisation. Ces résultats nous permettent de vérifier l'analyse théorique des phénomènes instantanés dans le cas du séchage par DDS.

Pour cela nous avons utilisé un diaphragme de 1 mm permettant de réaliser des détentes lentes (quasi-statiques) (Voir Paragraphe § III.2.1.1.1.3)

Tableau III-19 Résultats du traitement de la pomme par DDS (Instantané et non-instantané)

POMME					$\omega$ (kg.s <sup>-1</sup> )			$\Omega$ (kg.cycle <sup>-1</sup> )		
DDS	P <sub>h</sub> (b)	P <sub>b</sub> (b)	t <sub>h</sub> (s)	t <sub>b</sub> (s)	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2
ATM-NI	6	1	20	5	6,1E-04	9,2E-04	9,0E-04	1,5E-02	2,3E-02	2,3E-02

ATM-I	6	1	20	5	1,1E-03	1,9E-03	1,6E-03	2,8E-02	4,7E-02	4,0E-02
VAC-NI	6	0,05	20	5	7,2E-04	5,4E-04	9,1E-04	1,8E-02	1,4E-02	2,3E-02
VAC-I	6	0,05	20	5	1,4E-03	2,3E-03	2,3E-03	3,5E-02	5,8E-02	5,7E-02

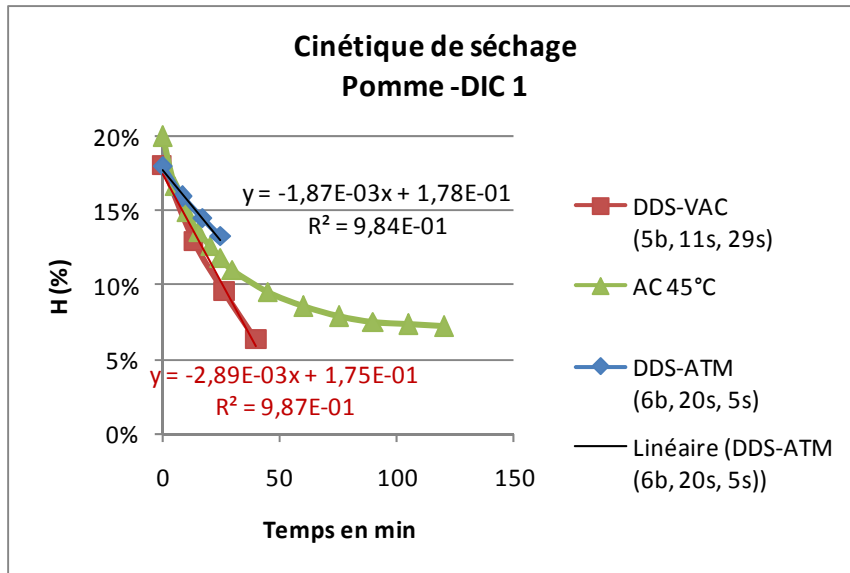
Tableau III-20 Résultats du traitement de l'oignon par DDS (Instantané et non-instantané)

Oignon					$\omega$ (kg.s <sup>-1</sup> )			$\Omega$ (kg.cycle <sup>-1</sup> )		
DDS-	P <sub>h</sub> (bar)	P <sub>b</sub> (bar)	t <sub>h</sub> (s)	t <sub>b</sub> (s)	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2
ATM-Non-Inst	6	1	20	5	1,0E-05	1,5E-05	1,5E-05	2,1E-04	3,2E-04	3,2E-04
ATM-Inst	6	1	20	5	1,9E-05	3,1E-05	2,7E-05	4,0E-04	6,6E-04	5,6E-04

Les résultats montrent l'importance de la vitesse de détente sur l'efficacité de séchage par cycle  $\Omega$ .

En effet, pour l'ensemble des traitements, une détente instantanée améliore d'un facteur supérieur à 1,5 l'efficacité de séchage par cycle lors du traitement DDS vers la pression atmosphérique et proche de 2 lors du traitement DDS vers le vide. Cela confirme les résultats antérieurs obtenus au laboratoire.

III.2.3.1.1.1.2 Comparaison des cinétiques de séchage



*Figure III-30 Exemple de comparaison des cinétiques de séchage de la pomme DIC1 (DDS-ATM, DDS-VAC et Air chaud 45°C)*

Nous notons que pour atteindre 7% d'humidité, la pomme nécessite deux heures de séchage par air chaud à 45°C, 40 minutes (60 cycles) de séchage par DDS vers le vide et presque 60 min<sup>3</sup> (144 cycles) de séchage par DDS vers a pression atmosphérique,

III.2.3.1.1.1.3 Validité du modèle

Le traitement des résultats expérimentaux sous la forme des expressions déduites de la modélisation de H en fonction du temps ou du nombre des cycles (Équation II-72 , ou Équation II-73 ) nous a permis d'obtenir des valeurs élevées du coefficient de régression R<sup>2</sup> (>95%) le modèle linéaire pourrait ainsi être considéré comme pertinent.

En plus de l'importance de ces résultats au plan de la validation du modèle linéaire considéré, l'analyse des cinétiques de séchage ainsi obtenue montrent que la quantité de vapeur générée dépend essentiellement du ratio  $v$  entre la pression haute et la basse pression, validant ainsi nos hypothèses sur le séchage par DDS.

III.2.3.1.1.1.4 Conclusion

La restructuration des fruits et légumes en morceaux au cours du séchage à travers l'utilisation de la détente instantanée contrôlée DIC, nous a amenés à utiliser la DIC en tant que premier procédé d'intensification du processus de déshydratation permettant de remédier au problème du retrait et donc améliorer la cinétique de séchage. Les produits finis sont de très haute qualité texturale, organoleptique et hygiénique.

Suite à cette étude, la Déshydratation par Détentes Successives DDS, qui a pour élément moteur la variation de la pression totale, semble être un moyen efficace pour remédier à l'étape paradoxale (Opposition entre le gradient de la pression partielle de vapeur d'eau et le gradient de température)

La Déshydratation par Détentes Successives peut être alors utilisée en tant qu'un procédé de deuxième intensification.

---

<sup>3</sup> Calcul réalisé en utilisant la régression linéaire correspondante

### **III.2.3.2 Le séchage par microondes**

L'utilisation des microondes, permet au cours de la déshydratation de chauffer le produit en volume (les molécules dipolaires telles que l'eau) réduisant ainsi le rôle du transfert interne de température par conduction. Le gradient de température est alors inversé et se trouve en phase avec le gradient de pression partielle de vapeur d'eau, remédiant ainsi à l'étape paradoxale.

Nous allons utiliser les microondes afin de les comparer, en tant qu'un deuxième moyen d'intensification, avec la Déshydratation par Détentes Successives..

#### **III.2.3.2.1 Cinétique**

Au cours du séchage, nous avons suivi l'évolution de la perte de masse des produits et nous avons ainsi établi les cinétiques de séchage. Nous avons noté l'évolution de l'humidité  $H$  du produit (ou de la teneur en eau  $w$  base sèche) en fonction du temps  $t$  :  $H=f(t)$  ou  $w=f(t)$ , sachant que chaque une minute et trente secondes correspond à 1 cycle.

#### **III.2.3.2.2 Traitement des résultats**

Lors des expérimentations par micro-ondes, nous avons utilisé les mêmes échantillons que ceux utilisés lors du séchage par air chaud et par DDS. Chaque échantillon a subit trois puissances différentes (360 W, 540W et 720 W). Le traitement a eu lieu sous forme de cycles de 1 min 30 s ; chaque cycle est composé de 30 s de traitement micro-ondes suivi d'un balayage d'air à température ambiante pendant une minute. Nous avons suivi l'évolution de la perte de masse après chaque cycle. Etant donné l'hétérogénéité du traitement par micro-ondes nous avons réalisé trois répétitions pour chaque échantillon, disposé en monocouche, et nous avons déterminé les valeurs moyennes.

Le traitement des données est réalisé, à titre comparatif, sur la base de l'application des équations, permettant de déterminer la diffusivité effective, que nous avons adoptées (Voir Paragraphe II.2.1.1.1). À partir de l'évolution du taux d'humidité en fonction du temps  $H=f(t)$ . on détermine la courbe de l'évolution du taux d'humidité en fonction du nombre des cycles  $H=f(N)$ .

### **III.2.3.2.3 Résultats**

La cinétique de séchage par micro-ondes est analysée pour chacune des expériences ainsi établies à partir des courbes donnant l'évolution de l'humidité en fonction du temps. Un tableau établissant les conditions opératoires et les paramètres de réponse (la diffusivité effective  $D_{\text{eff}}$  ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ), le taux d'expansion et l'humidité) a été dressé pour chacun des cas considérés. Les courbes de variation de l'humidité  $H$  (base humide) en fonction du temps sont ainsi réalisées.

Séchage MO- Pomme												
	$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)			$\xi$			$\varepsilon$			H		
	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2
360 W	1,3E-09	3,5E-09	3,5E-09	1,00	2,62	2,62	1,00	2,04	1,82	8,4%	4,6%	5,1%
540 W	5,1E-09	1,2E-08	1,1E-08	1,00	2,43	2,14	1,00	1,95	1,61	9,1%	4,5%	5,5%
720 W	1,6E-09	6,0E-08	2,1E-08	1,00	37,06	12,85	1,00	2,04	1,82	10,9%	5,3%	5,4%

Séchage MO- Oignon												
	$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)			$\xi$			$\varepsilon$			H		
	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2
360 W	1,85E-10	3,39E-10	8,61E-10	1,67	3,05	7,76	1,00	1,11	1,10	10,0%	6,4%	6,2%
540 W	4,47E-10	7,05E-10	2,10E-09	2,33	3,67	10,91	1,00	1,61	1,70	10,3%	6,0%	5,8%
720 W	4,45E-10	7,35E-10	2,57E-09	1,15	1,90	6,63	1,00	1,11	1,10	11,4%	7,0%	6,9%

Séchage MO- Courgette												
	$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)			$\xi$			$\varepsilon$			H		
	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2
360 W	1,12E-10	8,04E-10	4,61E-10	1,00	7,17	4,11	1,00	2,42	2,24	12,8%	4,7%	5,0%
540 W	3,31E-10	9,97E-10	1,34E-09	1,00	3,01	4,04	1,00	3,03	3,30	12,0%	5,2%	4,7%
720 W	9,36E-10	6,67E-09	7,10E-09	1,00	7,13	7,59	1,00	2,42	2,24	12,7%	6,0%	6,5%

Séchage MO- Patate Douce												
	$D_{eff}$ (m <sup>2</sup> /s)			$\xi$			$\varepsilon$			H		
	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2	MP	DIC 1	DIC 2
360 W	1,29E-10	9,55E-10	7,57E-10	1,00	7,40	5,86	1,00	2,42	2,24	12,8%	4,7%	5,0%
540 W	5,06E-10	1,23E-09	3,37E-09	1,00	2,43	6,66	1,00	3,03	3,30	12,0%	5,2%	4,7%
720 W	2,02E-09	7,42E-09	1,01E-08	1,00	3,66	4,97	1,00	2,42	2,24	12,7%	6,0%	6,5%



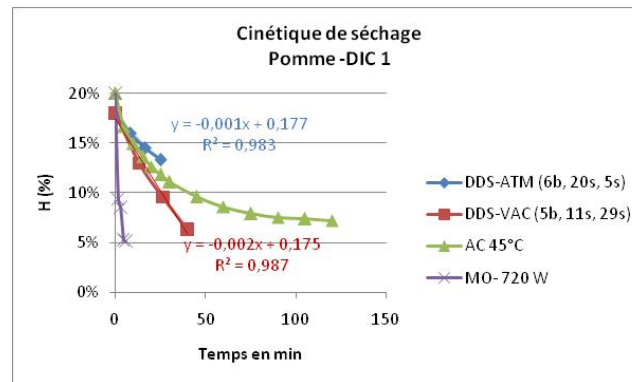


Figure III-31 Exemple de comparaison des cinétiques de séchage de la pomme DIC1(DDS-ATM, DDS-VAC, Air chaud 45°C et microondes (720 W))

### III.2.3.2.4 Conclusion

Le séchage par micro-ondes est un moyen très efficace pour remédier à l'étape paradoxale. La phase de séchage contrôlée par le gradient de pression partielle de vapeur d'eau se trouve intensifier grâce au chauffage direct du cœur du produit. Le gradient de température se trouve ainsi inverser, dans le même sens que le gradient de la pression partielle.

Le séchage des fruits et légumes en morceaux par micro-ondes est ainsi optimisé. En effet, l'utilisation des micro-ondes pendant la première période du séchage, où l'eau se trouve en quantité importante n'est pas recommandée, vue la consommation énergétique très importante et la possibilité de dégradation thermique du produit. Une application assez rapide des micro-ondes après une première intensification par expansion permet d'obtenir des produits déshydratés de très haute qualité texturale et organoleptique. A titre d'exemple, pour le traitement de la pomme DIC 1 à 720 W, seulement 4 min 30 s de traitement par combinaison des micro-ondes et de l'air comprimé à température ambiante (30 s MO +1min d'air) sont nécessaires pour passer de 20% d'humidité à 5% au lieu de 40 min avec la DDS-VAC et 120 min avec l'air chaud à 45°C.



**PARTIE IV.**  
**CONCLUSION ET PERSPECTIVES**



## Chapitre IV.1

### CONCLUSION

Les travaux présentés dans ce mémoire se situent dans le cadre de l'étude fondamentale des processus instantanés dans les opérations d'autovaporisation et de déshydratation.

#### IV.1.1 AUTOVAPORISATION

L'autovaporisation est l'élément moteur de nombreuses applications (Refroidissement des surfaces par pulvérisation, BLEVE, LOCA...). En effet, les études et quantifications expérimentales ont montré un impact systématique de l'instantanéité sur la quantité de liquide évaporé. Malgré les nombreuses applications aucune étude thermodynamique classique n'a pu expliquer les phénomènes observés. Seule une analyse théorique spécifique aux phénomènes d'instantanéité proposée par ALLAF en 2002, permet d'expliquer ce type d'autovaporisation.

Au cours de ce travail, nous avons pu apporter des éléments nouveaux à l'analyse théorique proposée. Ces éléments nous ont permis d'expliquer, lors des processus instantanés, le dépassement de l'état d'équilibre quasi-statique à travers le passage par un état intermédiaire de non-équilibre, pour lequel l'entropie totale générée est nulle. Une étude théorique spécifique aux phénomènes instantanés nous a permis de déterminer les valeurs minimales de températures atteintes suite à une détente instantanée dans les cas d'une gouttelette d'eau et d'une gouttelette de tétrafluoroéthane (CSC) et en déduire la quantité de liquide éliminée. Les valeurs ainsi obtenus corroborent les résultats expérimentaux présentés dans la bibliographie, ceux réalisés précédemment au laboratoire LMTAI (DIC, DDS et CVS) et ceux que nous avons réalisés.

Cette étude théorique montre clairement, l'intérêt de la vitesse de détente dans les opérations d'autovaporisation. En effet, après le passage par l'étape intermédiaire, le produit évolue vers son état d'équilibre. Ce retour à l'équilibre nécessite une durée de l'ordre de la seconde. Ainsi, une transformation réalisée pendant une durée supérieure à

une seconde évoluera quasi-statiquement vers son état d'équilibre alors qu'elle passera par une étape intermédiaire de non-équilibre correspondant à  $\Delta S \rightarrow 0$  lorsque  $\Delta t \rightarrow 0$ . En d'autres termes, le dépassement de l'équilibre quasi-statique est plus important quand  $\Delta t \rightarrow 0$ .

A partir de l'approche théorique et de l'ensemble des résultats obtenus, nous avons dressé les fondements de la thermodynamique de l'instantanéité :

- Une transformation complexe (plusieurs paramètres) réalisée instantanément génère une entropie totale nulle.
- Les différents paramètres thermodynamiques possèdent différentes priorités vis-à-vis de la recherche de l'équilibre.
- Une transformation simple (un seul paramètre) ne peut pas être réalisée instantanément.

Les fondements de la thermodynamique de l'instantanéité seront à la base de l'explication et la compréhension des phénomènes observés lors de l'autovaporisation pendant le BLEVE, le LOCA, le CSC, la délamination lors de l'impulse drying, le refroidissement des surfaces par pulvérisation, la DIC, la DDS, la CVS...

## **IV.1.2 DESHYDRATATION**

Dans la deuxième partie de ce travail, nous avons mené une étude fondamentale et expérimentale des processus instantanés dans les opérations de déshydratation des produits biologiques et cela en utilisant les fondements de la thermodynamique de l'instantanéité déjà établis.

Nous avons alors étudié les possibilités d'intensification du processus de séchage des fruits et légumes en morceaux.. Pour améliorer la cinétique de séchage lors de la période à vitesse décroissante, limitée par le transfert interne de la matière suite au rétrécissement du produit, une première intensification par expansion (DIC, puffing,...) est nécessaire pour re-texturer le produit en augmentant sa surface spécifique et l'espace interstitiel. Le transfert interne de la matière n'est plus le facteur limitant.

Cette première intensification est basée sur les fondements de la thermodynamique de l'instantanéité. En effet, le traitement DIC consiste à faire subir aux produits un traitement de type HTST, où la pression du milieu environnant passe « instantanément » d'une valeur haute vers le vide, produisant une autovaporisation d'une partie de l'eau et qui à travers des contraintes mécaniques va expander le produit. Ce dernier grâce à l'autovaporisation, va voir sa température chuter, d'où le refroidissement instantané.

Les résultats obtenus montrent l'importance de la vitesse de détente sur le taux d'expansion des produits et par conséquent sur la quantité d'eau éliminée par autovaporisation et sur la température.

Cette première intensification du séchage par expansion améliore les cinétiques de séchage en améliorant les transferts internes de matière.

A partir de l'étude fondamentale du processus de séchage, nous avons repéré la présence d'un gradient de température, entre la surface et le cœur du produit, en opposition avec le gradient de pression partielle de vapeur d'eau. Cette étape antonymique a été qualifiée de paradoxale.

Cette étape paradoxale se trouve accentuer par la diminution de la conductivité thermique du produit suite à son expansion. En effet, le transfert interne de chaleur devient alors le facteur limitant.

Une deuxième intensification s'impose pour remédier à cette accentuation. Pour cela, nous avons étudié l'utilisation de la Déshydratation par Détentes Successives et des micro-ondes.

La Déshydratation par Détentes Successives a pour élément moteur la variation de la pression totale du système d'un niveau haut vers un niveau bas. L'étude fondamentale de la DDS confirmée par les résultats expérimentaux a montré l'importance de la vitesse et du ratio de détente sur les cinétiques de séchage. Pour une détente instantanée, l'efficacité de séchage était 2 fois supérieure à celle obtenue lors d'une détente « quasi-statique » Ces résultats rejoignent les calculs théoriques obtenus par les fondements de la thermodynamique de l'instantanéité. Nous avons également pu prouver que, tant que l'activité de l'eau est élevée, l'efficacité de séchage par DDS (et donc la quantité d'eau

éliminée) est constante au cours des cycles, elle ne dépend que de la vitesse et du ratio de détente.

A titre de comparaison avec le séchage par DDS dont l'élément moteur est le gradient de pression totale, nous avons étudié l'utilisation des microondes comme un moyen de deuxième intensification. Les microondes, grâce au chauffage en volume, ont permis d'inverser le gradient de température et par conséquent remédier efficacement à l'étape paradoxale.



## **Chapitre IV.2**

### **PERSPECTIVES**

Les études fondamentales et expérimentales réalisées au cours de ce travail nous ont permis de poser les fondements de la thermodynamique de l'instantanéité. Nous avons pu répondre à des questions indispensables pour l'explication et la compréhension des processus instantanés dans les opérations d'autovaporisation et de déshydratation.

Ce mémoire n'est cependant que le début d'une étude assez vaste et variée que nous n'avons pas pu approfondir et qui fera partie des perspectives de ce travail.

#### **IV.2.1 AUTOVAPORISATION**

##### **IV.2.1.1 Modélisation de l'expansion**

Lors de cette étude, nous avons posé les équations de bases pour la modélisation de l'expansion des produits biologiques suite à leur traitement par DIC. Ce modèle est basé sur celui développé par Woods & al (Woods, 1998) (Woods, et al., 2000) dans le cadre de la modélisation de l'expansion du papier par Impulse drying, une technique innovante et efficace pour le séchage du papier qui a souffert d'une faiblesse considérable, c'est le soufflage du papier dû à la pression développée dans les pores. Ce phénomène est connu sous le nom de délamination, ce n'est autre que la rupture du réseau fibreux de la feuille du papier.

Ce modèle est basé sur les lois établis de la thermodynamique et de la physique. Nous avons considéré que le produit est formé par une matrice de pores qui sont reliés entre

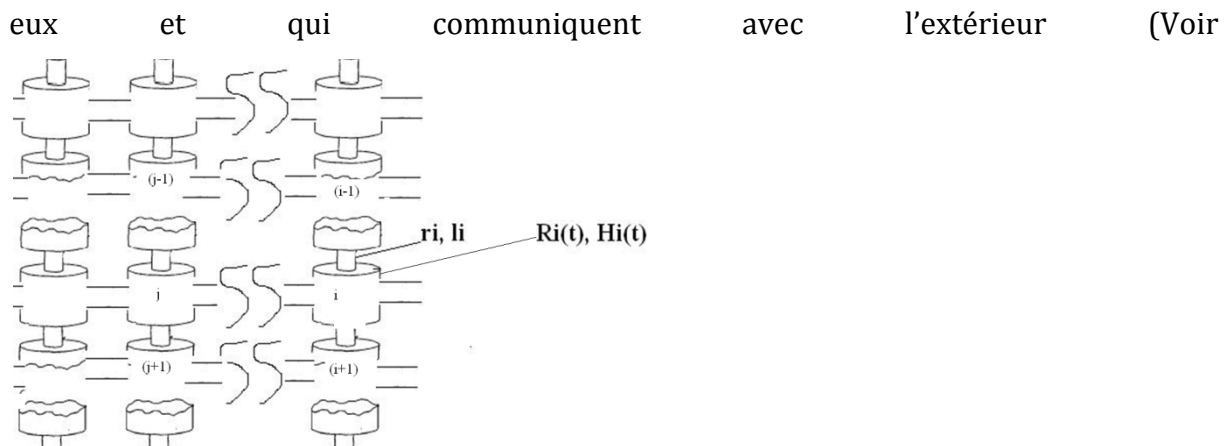


Figure IV-1 Système de pores dans le produit). Le modèle établi permet de prédire l'évolution de la forme et de la dimension des pores en fonction du temps.

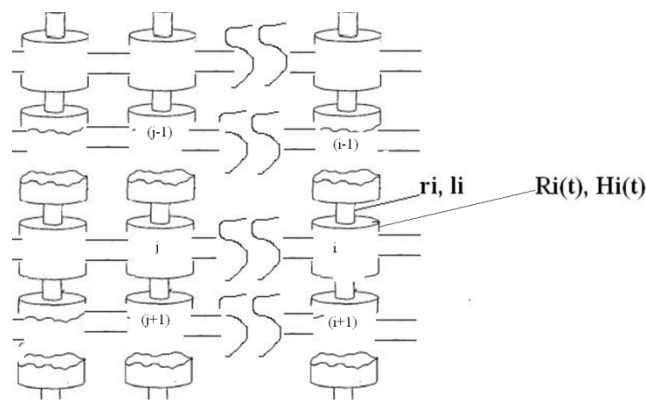


Figure IV-1 Système de pores dans le produit

Pour faciliter la modélisation, nous avons considéré une série de pores (Les pores  $i$ ,  $i=1..n$ ) limitée à gauche par la série  $h$ ,  $h=1..n$  et à droite par la série  $j$ ,  $j=1..n$ . Les pores sont considérés comme étant des cylindres de rayon variable  $R_i(t)$  et de hauteur variable  $H_i(t)$ ;  $i=1..n$ ,  $t>0$ . Ils sont reliés entre eux à l'aide de capillaires permettant le déplacement de la vapeur d'eau. Les capillaires ont une longueur constante  $l$  et un rayon constant  $r$ , quelque soit la valeur de  $a,b,c,...h$ ,  $i$  et  $j$ ,...

La section de passage de la vapeur d'eau au sommet du pore  $i$  est donnée alors par :

$$\text{Équation IV-1} \quad \tilde{A}_i = \pi r^2$$

Les capillaires aux extrémités sont ouverts à l'extérieur et la pression à la surface du produit est maintenue à  $p_0(t)$ ,  $t > 0$ . La pression dans le pore  $i$  est considérée comme étant homogène et sera notée  $p_i(t)$ ,  $t > 0$ . Suite à l'autovaporisation, la pression  $p_i$  augmente dans le pore  $i$  (Quelque soit  $i$ ) ; elle peut être renforcée par la vapeur d'eau provenant des pores  $(i-1)$ ,  $(i+1)$ ,  $(h)$  et  $(j)$  ou réduite suite à l'évacuation de vapeur d'eau dans ces pores. Le sens de déplacement de la vapeur d'eau est contrôlé par la différence de pression entre les pores  $(i-1)$ ,  $i$ ,  $(i+1)$ ,  $h$  et  $j$ . La vapeur peut quitter le produit à travers toute la surface externe.

A  $t > 0$ , la pression dans le pore  $i$  exerce une force sur les surfaces, supérieure, inférieure et latérale du cylindre, la partie latérale est divisée en deux parties égales (une partie Gauche, G, et une partie droite, D). Ces surfaces sont égales à :

$$\text{Équation IV-2} \quad A_i^{sup} = \pi(R_i^2 - r^2)$$

$$\text{Équation IV-3} \quad A_i^{inf} = \pi(R_i^2 - r^2)$$

$$\text{Équation IV-4} \quad A_i^{lat G} = \pi R_i(t)H_i(t) - \pi r^2$$

$$\text{Équation IV-5} \quad A_i^{lat D} = \pi R_i(t)H_i(t) - \pi r^2$$

Les forces exercées sur ces surfaces vont servir à allonger les fibres et donc augmenter le volume du pore  $V_i(t)$ ,  $i=1..n$  et  $t$  allant de 0 à  $t' > 0$

L'étirement des fibres latérales de chaque pore dépend de l'eau contenu dans ces fibres à l'instant  $t$ , ce qui affecte les propriétés viscoélastiques du produit. Le modèle proposé est gouverné par trois équations pour chaque pore: une première basée sur l'équation du ressort avec une force extérieure qui dépend du temps, une deuxième basée sur le premier principe de la thermodynamique et la troisième basée sur la conservation de la masse d'eau contenue dans le système de pores.

Pour le  $i^{\text{ème}}$  pore, les équations associent les variations temporelles de  $p_i(t)$  et  $V_i(t)$  qui sont associées elles-mêmes à l'évolution temporelle des pores  $(i-1)$ ,  $(i+1)$ ,  $h$  et  $j$ .

La première équation qui régit ce système prend la forme générale suivante :

$$\text{Équation IV-6} \quad m_i^f \frac{d^2 v_i}{dt^2} + c_i(t) \frac{dv_i}{dt} + k_i(t) v_i(t) = F_i(t)$$

Où :

$k_i(t)$  est la constante de raideur, elle dépend de la constante de raideur  $k_d$  des fibres sèches et de l'évolution de la masse d'eau dans les fibres :

$$\text{Équation IV-7} \quad k_i(t) = k(m_i^w(t), k_d)$$

$c_i(t)$  le coefficient d'amortissement viscoélastique des fibres de la surface latéral du  $i^{\text{ème}}$  pore, il dépend du coefficient viscoélastique des fibres sèches  $c_d$  et de l'évolution en fonction du temps de la masse d'eau contenue dans les fibres :

$$\text{Équation IV-8} \quad c_i(t) = c(m_i^w(t), c_d)$$

$m_i^f$  la masse intrinsèque de ces fibres et  $v_i(t)$  représente l'augmentation du volume ou la compression des fibres par rapport à leur volume à l'équilibre  $V^e$  :

$$\text{Équation IV-9} \quad v_i(t) = V_i(t) - V^e$$

$F_i(t)$  est la force générée par la pression  $p_i(t)$  développée dans le pore  $i$  :

$$\text{Équation IV-10} \quad F_i(t) = A_i^{sup}(p_i(t) - \delta_i p_0(t)) + A_i^{inf}(p_i(t) + \varepsilon_i p_0(t)) + A_i^{lat G}(p_i(t) - \zeta_i p_0(t)) + A_i^{lat D}(p_i(t) + \xi_i p_0(t))$$

- ✚  $\delta_i$  est la fraction de la force externe  $p_0(t)$  transmise jusqu'à la surface supérieure du pore  $i$
- ✚  $\varepsilon_i$  est la fraction de  $p_0(t)$  transmise vers la partie inférieure du pore  $i$
- ✚  $\zeta_i$  est la fraction de  $p_0(t)$  transmise à gauche du pore  $i$
- ✚  $\xi_i$  est la fraction de  $p_0(t)$  transmise à droite du pore  $i$

La deuxième équation du système concernant la conservation de la masse peut être écrite sous la forme suivante :

$$\text{Équation IV-11} \quad \frac{dm_i^g}{dt} = \left(\frac{dm_i^g}{dt}\right)^V + \left(\frac{dm_i^g}{dt}\right)^T + \left(\frac{dm_i^g}{dt}\right)^B + \left(\frac{dm_i^g}{dt}\right)^G + \left(\frac{dm_i^g}{dt}\right)^D \quad \text{pour}$$

$i=1..n$  Où :

- ✚  $m_i^g$  est la masse de vapeur d'eau dans le pore  $i$  à  $t>0$
- ✚  $\left(\frac{dm_i^g}{dt}\right)^V$  est le taux de variation de la masse de vapeur d'eau dans le pore  $i$  due à la transformation d'eau en vapeur,
- ✚  $\left(\frac{dm_i^g}{dt}\right)^T$  est le taux de variation de la masse de vapeur d'eau dans le pore  $i$  due aux échanges de vapeur à travers sa surface supérieure

✚  $\left(\frac{dm_i^g}{dt}\right)^B$  est le taux de variation de la masse de vapeur d'eau dans le pore i due aux échanges de vapeur à travers sa surface inférieure

✚  $\left(\frac{dm_i^g}{dt}\right)^G$  est le taux de variation de la masse de vapeur d'eau dans le pore i due aux échanges de vapeur à travers sa surface latérale vers la gauche

✚  $\left(\frac{dm_i^g}{dt}\right)^D$  est le taux de variation de la masse de vapeur d'eau dans le pore i due aux échanges de vapeur à travers sa surface latérale vers la droite

Notons aussi que la vapeur d'eau qui sort par le bas du pore i est égale à celle qui rentre dans le pore i+1 à travers sa surface supérieure et que celle qui sort par la gauche du pore i à travers sa surface latérale est égale à celle qui rentre dans le pore h .

$$\text{Équation IV-12} \quad \left(\frac{dm_i^g}{dt}\right)^B = -\left(\frac{dm_{i+1}^g}{dt}\right)^T$$

$$\text{Équation IV-13} \quad \left(\frac{dm_i^g}{dt}\right)^G = -\left(\frac{dm_h^g}{dt}\right)^D$$

Et l'équation (73) s'écrira alors sous la forme suivante :

$$\text{Équation IV-14} \quad \frac{dm_i^g}{dt} = \left(\frac{dm_i^g}{dt}\right)^V + \left(\frac{dm_i^g}{dt}\right)^T - \left(\frac{dm_{i+1}^g}{dt}\right)^T + \left(\frac{dm_i^g}{dt}\right)^D - \left(\frac{dm_h^g}{dt}\right)^D$$

Pour des raisons de simplification, nous pouvons considérer que la quantité de vapeur qui sort vers l'extérieur soit identique dans tous les capillaires surfaciques :

$$\text{Équation IV-15} \quad \left(\frac{dm_n^g}{dt}\right)^B = \left(\frac{dm_1^g}{dt}\right)^T = \left(\frac{dm_a^g}{dt}\right)^G = \left(\frac{dm_z^g}{dt}\right)^D$$

La troisième équation du système est basée sur le premier principe de la thermodynamique. En effet, le travail effectué par la pression dans le pore i (i=1,..n) va servir à modifier le volume du pore. Donc on peut écrire :

$$\text{Équation IV-16} \quad \frac{dW_i}{dt} = p_i(t) \frac{dV_i}{dt}$$

D'après le premier principe de la thermodynamique le débit de chaleur échangé dans le pore i  $\frac{dQ_i}{dt}$  peut être écrit de la façon suivante :

$$\text{Équation IV-17} \quad \frac{dQ_i}{dt} = \frac{dU_i}{dt} + p_i(t) \frac{dV_i}{dt}$$

Où  $U_i$  est l'énergie interne de la vapeur d'eau dans le pore

et  $V_i$  est le volume du pore

Dans les conditions suivantes nous avons  $\frac{dQ_i}{dt} \approx 0$  d'où :

$$\text{Équation IV-18} \quad \frac{dU_i}{dt} = -p_i(t) \frac{dV_i}{dt}$$

Ce modèle n'a pas pu être résolu au cours de ce travail, il serait intéressant de modéliser l'expansion de certains produits biologiques en utilisant et améliorant ce modèle.

### **IV.2.1.2 Quantification et mélanges complexes**

Il serait intéressant, comme suite à ce travail, d'étudier et de quantifier les phénomènes observés lors d'une détente instantanée d'un mélange complexe de liquide en vu de leur éventuelle séparation.

### **IV.2.1.3 Nouvel axe de recherche**

Au cours de cette thèse, nous avons pu poser les fondements de la thermodynamique de l'instantanéité. Une étude fondamentale nous a permis d'expliquer et de comprendre l'ensemble des phénomènes observés lors des processus instantanés.

Ces fondements ainsi établis seront la base d'une nouvelle « théorie », d'un nouvel axe de recherche fondamentale et appliquée permettant d'expliquer, d'analyser et de quantifier l'ensemble des processus instantanés connus (Big Bang (?), Spray pyrolysis, BLEVE,...) et de développer de nouveaux procédés.

**PARTIE V.**  
**TRAVAUX CITE**

- [1]. **Aguilar G. [et al.]** Characterization of cryogenic spray nozzles with application to skin cooling [Conférence] // The International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE. - Orlando, Florida : [s.n.], 2000. - pp. 1-10.
- [2]. **Aguilar G. [et al.]** Cryogen Spray Cooling Efficiency: Improvement of Port Wine Stain Laser Therapy Through Multiple-Intermittent Cryogen Spurts and Laser Pulses [Revue] // Lasers in Surgery and Medicine. - 2002. - 31. - pp. 27-35.
- [3]. **Aguilar G. [et al.]** Dynamic Behavior of Cryogen Spray Cooling: Effects of Spurt Duration and Spray Distance [Revue] // Lasers Surgery Medicine. - 2003. - 32. - pp. 152-159.
- [4]. **Aguilar G. [et al.]** Effect of spurt duration on the heat transfer dynamics during cryogen spray cooling [Revue] // Phys. Med. Biol.. - 2003. - 48. - pp. 2169-2181.
- [5]. **Aguilar G. [et al.]** Experimental Study of Cryogen Spray Properties for Application in Dermatologic Laser Surgery [Revue] // IEEE Trans. Biomed.Eng. - 2003. - 7 : Vol. 50. - pp. 863-870.
- [6]. **Aguilar G. [et al.]** Influence of angle between the nozzle and skin surface on the heat flux and overall heat extraction during cryogen spray cooling [Revue] // Phys. Med. Biol.. - 2004. - 49. - pp. 147-153.
- [7]. **Aguilar G. [et al.]** Influence of Nozzle-to-Skin Distance in Cryogen Spray Cooling for Dermatologic Laser Surgery [Revue] // Lasers in Surgery and Medicine. - 2001. - 28. - pp. 113-120.
- [8]. **Aguilar G. [et al.]** Measurement of Heat Flux and Heat Transfer Coefficient During Continuous Cryogen Spray Cooling for Laser Dermatologic Surgery [Revue] // IEEE J. Selected Topics Quantum Electr.. - 2001. - 6 : Vol. 7. - pp. 1013-1021.
- [9]. **Aguilar G. [et al.]** On the modeling and characterization of cryogen spray cooling for application to port wine stain laser therapy [Conférence] // 9th Latin American Cong. Heat Mass trans.. - San Juan, Puerto Rico : [s.n.], 2002.
- [10]. **Aguilar G. [et al.]** Theoretical and experimental analysis of droplet diameter, temperature, and evaporation rate evolution in cryogenic sprays [Revue] // Int. J. Heat Mass Transfer. - 2001. - 44. - pp. 3201-3211.
- [11]. **Al-Haddad M. [et al.]** Fruits & vegetables drying combining hot air, DIC technology and microwaves [Conférence] // The 5th Asian Pacific Drying Conference. - Hong Kong : [s.n.], 2007.
- [12]. **Al-Haddad M. [et al.]** Thermodynamics of Instantaneous Processes : Fundamental Approach [Conférence] // The First French-MFLU Seminar. - Chiang Rai, Thailand : [s.n.], 2006.



- [13]. **Allaf K. [et al.]** Procédé de traitement de produits biologiques en vue de la modification de leur texture, installations pour la mise en œuvre d'un tel procédé et produits ainsi réalisés [Brevet] : Brevet n° 9309720 du 6 août 1993. Extension internationale n° PCT/FR94/00975. - 1993.
- [14]. **Allaf K. [et al.]** Procédé De Traitement Thermique,Thermo-Mécanique, Hydro-Thermique Et Hydro-Thermo-Mécanique De Produits Divers Solides Ou Pulvérulents, Pâteux, Liquides Ou Mélange De Liquides, Applications De Ce Procédé Et Installation Pour La Mise En Œuvre De Ce Procédé [Brevet] : Brevet Français Issu De La Demande N° FR 98/11106 Du 04/09/98 Sous Priorité De La Demande Française N° 98/02032 Du 19/02/98 Publiée Le 20 Août 1999 Sous Le N° 2 774 911. Demande PCT FR99/00369 Du 18 Février 1999 . - 1998.
- [15]. **Allaf K.** Analyse de l'instantanéité dans les Processus Thermodynamiques ; Lois Fondamentales de la Thermodynamique de l'instantanéité. [Conférence] // 1er Symposium Franco- Libanais sur les technologies et études en Génie des Procédés et Biochimie.. - Beyrouth : [s.n.], 2002.
- [16]. **Allaf K.** Approche à l'analyse fondamentale de l'expansion par alvéolation selon différents procédés (puffing, cuisson-extrusion...). [Rapport] : DTAI / Université de Technologie de Compiègne. - Compiègne : UTC, 1988.
- [17]. **Allaf K.** Contribution à l'analyse des processus d'expansion des polymères biologiques ; Implication de l'instantanéité dans l'apport énergétique et le maintien du niveau isentropique total. Application au cas de la cuisson-extrusion // Rapport interne. - Compiègne : [s.n.], 1989.
- [18]. **Allaf K.** Loi de Transfert [Rapport] : Cours. - 1982.
- [19]. **Amram P.** Thermodynamique macroscopique. - 2002. - pp. 1-7.
- [20]. **Andreev S.N. [et al.]** On the theory of explosive boiling of a transparent liquid on a laser-heated target [Revue] // Appl. Surf. Sci. - 2006. - 252. - pp. 4506-4510.
- [21]. **Aoki I.** Analysis of characteristics of flash evaporation under low pressure conditions [Revue] // Heat Transfer - Asian research. - 2000. - 1 : Vol. 29. - pp. 22-33.
- [22]. **Aoki I.** Water flash evaporation under low pressure conditions [Revue] // Heat Transfer- Japanese Research. - 1994. - 6 : Vol. 23. - pp. 544-555.
- [23]. **Avksentyuk B.P. [et al.]** An explosive boiling at superheats close to the limit [Revue] // Russ. J. Eng. Thermophys.. - 1999. - 1-2 : Vol. 9.
- [24]. **Bai Y. [et al.]** State Diagram of apple slices: glass transition and freezing curves [Revue]. - 2001. - 34. - pp. 89-95.
- [25]. **Becker B.R. [et al.]** Food thermophysical property models [Revue] // Int. Comm. Heat Mass Transfer. - 1999. - 5 : Vol. 26. - pp. 627-636.

- [26]. **Berg A.C. van den [et al.]** Expansion-controlled evaporation: a safe approach to BLEVE blast [Revue] // J. Loss Prev. Process Ind.. - 2004. - 17. - pp. 397-405.
- [27]. **Besson A. et Bauer W.** Cours: Sciences alimentaires 1-Les traitements thermiques // Procédés thermiques de conservation. - Lausanne : [s.n.], 2000. - pp. 43-49.
- [28]. **Białobrzewski I. [et al.]** Simulation of changes in the density of an apple slab during drying [Revue] // Int. Comm. Heat Mass Transfer. - 2006. - 33. - pp. 880-888.
- [29]. **Birk A.M. [et al.]** Liquid temperature stratification and its effect on BLEVEs and their hazards [Revue] // J. Hazardous Materials. - 1996. - 48. - pp. 219-237.
- [30]. **Bloom F. [et al.]** Modelling and Analysis of the Heat Transfer Problem in an Impulse Drying Press Roll [Revue] // Math. Comput. Modelling. - 1999. - 29. - pp. 59-88.
- [31]. **Bonazzi C. et Bimbenet J.-J.** Séchage des produits alimentaires- Principes [Article] // Techniques de l'ingénieur. - [s.l.] : Techniques de l'ingénieur. - F3000 : Vol. Agroalimentaire.
- [32]. **Buyevich Y.A. [et al.]** Cooling of a superheated surface with a jet mist flow [Revue] // Int. J. Heat Mass Transfer. - 1996. - 11 : Vol. 39. - pp. 2353-2362.
- [33]. **Campos F.B. [et al.]** Simultaneous heat and mass transfer during the ascension of superheated bubbles [Revue] // Int. J. Heat Mass Transfer. - 2000. - 43. - pp. 179-189.
- [34]. **Carmeliet J. [et al.]** Determination of the Liquid Water Diffusivity from Transient Moisture Transfer Experiments [Revue] // J. Therm. Env. Bldg. Sci.. - 2004. - 4 : Vol. 27. - pp. 277-305.
- [35]. **Casal J. [et al.]** BLEVE: A new approach to the superheat limit temperature [Revue] // J. Loss Prev. Process Ind.. - 2006. - 19. - pp. 690-700.
- [36]. **Casal J. [et al.]** Using liquid superheating energy for a quick estimation overpressure in BLEVEs and similar explosions [Revue] // J. Hazardous Materials. - 2006.
- [37]. **Charreau A. et Cavallé R.** Séchage- Théorie et Calculs [Article] // Techniques de l'ingénieur. - [s.l.] : Techniques de l'ingénieur. - J2480 : Vol. Génie des Procédés.
- [38]. **Chen H.-J. [et al.]** Modeling a Boiling-Liquid, Expanding-Vapor Explosion Phenomenon with Application to Relief Device Design for Liquefied Ammonia Storage [Revue] // Ind. Eng. Chem. Res.. - 1999. - 38. - pp. 479-487.

- [39]. **Chen R.-H. [et al.]** Effects of spray characteristics on critical heat flux in subcooled water spray cooling [Revue] // Int. J. Heat Mass Transfer. - 1998. - 45. - pp. 4033-4043.
- [40]. **Chen R.-H. [et al.]** Optimal spray characteristics in water spray cooling [Revue] // Int. J. Heat Mass Transfer. - 2004. - 47. - pp. 5095-5099.
- [41]. **Chen X.D. [et al.]** On the ratio of heat to mass transfer coefficient for water evaporation and its impact upon drying modeling [Revue] // Int. J. Heat Mass Transfer. - [s.l.] : Pergamon, 2002. - 45. - pp. 4369-4372.
- [42]. **Clérac R. [et al.]** Cours de thermodynamique // Cours et travaux dirigés de thermodynamique. - 2003. - pp. 1-23.
- [43]. **Crank J.** The mathematics of diffusion [Livre]. - [s.l.] : Clarendon Press, 1975. - 2e édition : pp. 11-103. - ISBN 0-19-8533446.
- [44]. **Debs-Louka E.** Destruction des microorganismes par voie thermomécanique contrôlée dans des produits solides en morceaux ou en poudre. Application aux épices et aromates. [Thèse de doctorat- Université de La Rochelle]. - La Rochelle : [s.n.], 2000.
- [45]. **Delgado-Rosas M.** Analyse et conception d'un réacteur à pulvérisation contrôlée sous vide (VCS) [Rapport] : Thèse / Université de La Rochelle. - La Rochelle : [s.n.], 2002.
- [46]. **Donsi G. [et al.]** Experimental determination of thermal conductivity of apple and potato at different moisture content [Revue] // J. Food Eng.. - 1996. - 30. - pp. 263-268.
- [47]. **Ealre R.L. et Earle M.D.** Drying [Section du livre] // Unit operations in food processing. - [s.l.] : Pergamon Commonwealth and International Library, 2004. - Web édition. - ISBN 0-08-025536-1.
- [48]. **Elias E. [et al.]** Bubble transport in Flashing Flow [Revue] // Int. J. Multiphase Flow. - 2000. - 26. - pp. 191-206.
- [49]. **Elustondo M.P. [et al.]** A model for the dehydration rate of onions [Revue] // J. Food Eng.. - 1996. - 29. - pp. 375-386.
- [50]. **Fabiano B. [et al.]** Theoretical and experimental investigation into the explosive boiling potential of thermally stratified liquid-liquid system [Revue] // J. Hazardous Materials. - 2002. - pp. 107-121.
- [51]. **Fard M.B. [et al.]** Cooling effectiveness of a water drop impinging on a hot surface [Revue] // Int. J. Heat Fluid Flow. - 2001. - 22. - pp. 201-210.
- [52]. **Fath H.E.S.** The non-equilibrium factor and the flashing evaporation rate inside the flash chamber of a multi-stage flash desalination plant [Revue] // Desalination. - 1997. - 114. - pp. 277-287.
- [53]. **Fontana A.J. [et al.]** Simultaneous thermal conductivity, thermal resistivity, and thermal diffusivity measurement of selected foods and soils

- [Conférence] // ASAE, The society for engineering in agriculture, food, and biological systems. - Sacramento, California : [s.n.], 2001.
- [54]. **Fontana A.J. [et al.]** Thermal properties of selected foods using dual needle heat-pulse sensor [Conférence] // ASAE. - Toronto, Ontario : [s.n.], 1999.
- [55]. Food processing technology: Principles and practice [Livre].- [s.l.] : Woodhead publishing & CRC Press LLC, 2000. - 2e édition : p. Chapitre 15.
- [56]. **Funebo T. [et al.]** Microwave-assisted Air Dehydration of Apple and Mushroom [Revue] // J. Food Eng.. - 1998. - 38. - pp. 353-367.
- [57]. **Genin N. [et al.]** Analyse du rôle de la transition vitreuse dans les procédés de conservation agro-alimentaires [Revue] // J. Food Eng.. - 1995. - 26. - pp. 391-408.
- [58]. **Giri A. [et al.]** Analysis of bubble dynamics in explosive boiling of droplet with fine fragmentation [Revue] // Exp. Therm. Fluid Sci.. - 2005. - 29. - pp. 295-303.
- [59]. **Gong Y.W. [et al.]** A simplified model to predict the thermal response of PLG and its influence on BLEVE [Revue] // J. Hazardous Materials. - 2004. - 108 : Vol. A. - pp. 21-26.
- [60]. **Habba A.** Nouveaux procédés de précuisson et d'étuvage du riz par détente instantanée contrôlée (DIC) : analyse des opérations, optimisation des procédés et approche à l'industrialisation [Rapport] : Thèse / Université de Technology de Compiègne. - Compiègne : [s.n.], 1997.
- [61]. **Haddad J.** Impacts des procédés hydro-thermo-mécaniques dans la valorisation des graines oléoprotéagineuses [Rapport] : Thèse / Université de La Rochelle. - La Rochelle : [s.n.], 2002.
- [62]. **Hahne E. [et al.]** Evaporation waves in flashing processes [Revue] // Int. J. Multiphase Flow. - 2000. - 26. - pp. 531-547.
- [63]. **Hao Y. [et al.]** The collapse of vapor bubbles in a spatially non-uniform Flow [Revue] // Int. J. Heat Mass Transfer. - 2000. - 43. - pp. 3539-3550.
- [64]. **Harigel G.G. [et al.]** Measurement of bubbles in a superheated liquid [Revue] // Nuc. Instr. Methods Phys. Res. A. - 1999. - 421. - pp. 12-22.
- [65]. **Harvie D.J.E. [et al.]** A hydrodynamic and thermodynamic simulation of droplet impacts on hot surfaces, Part I: theoretical model [Revue] // Int. J. Heat Mass Transfer. - 2001. - 44. - pp. 2633-2642.
- [66]. **Hill J.M.** Modelling microwave heating [Revue] // Appl. Math. Modelling. - 1996. - Vol. 20. - pp. 3-15.
- [67]. **Hsieh S.-S. [et al.]** Spray cooling characteristics of water and R-134a. Part I: nucleate boiling [Revue] // Int. J. Heat Mass Transfer. - 2004. - 47. - pp. 5703-5712.

- [68]. **Hsieh S.-S. [et al.]** Spray cooling characteristics of water and R-134a. Part II: transient cooling [Revue] // Int. J. Heat Mass Transfer. - 2004. - 47. - pp. 5713-5724.
- [69]. **Ikegama Y. [et al.]** Experimental study on a spray flash desalination [Revue] // Desalination. - 2006. - 194. - pp. 81-89.
- [70]. **Irudayaraj J.** Food processing operations modeling- Design and analysis [Livre]. - [s.l.] : Marcel DEKKER, 2002. - p. Chapitres 1;6. - ISBN 0-8247-0488-6.
- [71]. **Ivashnev O. E. [et al.]** Thermal Growth of a Vapor Bubble Moving in a Superheated Liquid [Revue] // Fluid Dynamics. - 2004. - 3 : Vol. 33. - pp. 414-428.
- [72]. **Jernqvist A. [et al.]** Simulation of thermal desalination processes [Revue] // Desalination. - 2001. - 134. - pp. 187-193.
- [73]. **Jia W. [et al.]** Experimental investigation of droplet dynamics and heat transfer in spray cooling [Revue] // Exp. Thermal Fluid Sci.. - 2003. - 27. - pp. 829-838.
- [74]. **Jin W.X. [et al.]** Some Experimental observations on the single and multi-phase flow patterns in a model flash evaporation chamber [Revue] // Int. Comm. HeatMass Transfer. - 1999. - 6 : Vol. 26. - pp. 839-848.
- [75]. **Juhel F.** Etude de l'application de deux nouvelles opérations de séchage/texturation du poisson; analyse comparative du procédé et du produit. // Thèse de Doctorat- Université de La Rochelle.. - La Rochelle : [s.n.], 2000.
- [76]. **Kalogirou S.A. [et al.]** Design of a new spray-type seawater evaporator [Revue] // Desalination. - 2001. - 139. - pp. 345-352.
- [77]. **Karapetian E. [et al.]** Effects of mass flow rate and droplet velocity on surface heat flux during cryogen spray cooling [Revue] // Phys. Med. Biol.. - 2003. - 48. - pp. N1-N6.
- [78]. **Khabeev N.S. [et al.]** Simulation of vapour explosions [Revue] // Appl. Energy. - 1999. - 64. - pp. 317-321.
- [79]. **Kim B.S. [et al.]** Study on ice slurry production by water spray [Revue] // Int. J. Refrigeration. - 2001. - 24. - pp. 176-184.
- [80]. **Kim H. [et al.]** The effect of ambient pressure on the evaporation of a single droplet and a spray [Revue] // Combustion and flame. - 2003. - 135. - pp. 261-270.
- [81]. **Kim J.-I. [et al.]** Some critical transitions in pool flash evaporation [Revue] // Int. J. Heat Mass Transfer. - 1997. - 10 : Vol. 40. - pp. 2363-2372.
- [82]. **Kim J.-I.** Some critical transitions in pool flash evaporation [Revue] // Int. J. Heat Mass Transfer. - 1997. - 10 : Vol. 40. - pp. 2363-2372.

- [83]. **Klima L.** Chauffage des matériaux par micro-ondes [Rapport] : Thèse / Université de La Rochelle. - La Rochelle : [s.n.], 2006.
- [84]. **Koshizuka S. [et al.]** Numerical analysis of fragmentation mechanisms in vapor explosions [Revue] // Nuclear Eng. Design. - 1999. - 189. - pp. 423-433.
- [85]. **Kostaropoulos A.E. [et al.]** Thermal diffusivity of granular and porous foods at low moisture content [Revue] // J. Food Eng.. - 1997. - 33. - pp. 101-109.
- [86]. **Kristiawan M. [et al.]** Effect of pressure-drop rate on the isolation of cananga oil using instantaneous controlled pressure-drop process [Revue] // Chem. Eng. Process.. - 2008. - 47. - pp. 66-75.
- [87]. **Kristiawan M. [et al.]** Isolation of indonesian cananga oil by instantaneous controlled pressure drop: Influence of processing parameters on compound yield [Revue]. - 2007. - 11 : Vol. 40. - pp. 1021-1029.
- [88]. **Kristiawan M.** Traitement thermo-mécanique des fleurs d'ylang-ylang indonésienne par détente instantanée contrôlée [Rapport] : Thèse / Université de La Rochelle. - La Rochelle : [s.n.], 2006.
- [89]. **Krokida M.K. [et al.]** Drying kinetics of some vegetables [Revue] // J. Food Eng.. - 2003. - 59. - pp. 391-403.
- [90]. **Lee H.S. [et al.]** Spherical vapor bubble growth in uniformly superheated liquids [Revue] // Int. J. Heat Mass Transfer. - 1996. - 12 : Vol. 39. - pp. 2427-2447.
- [91]. **Lewicki P.P. [et al.]** Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples [Revue] // J. Food Eng.. - 2004. - 64. - pp. 307-314.
- [92]. **Li H. [et al.]** Theoretical simulation of explosive boiling [Revue] // Int. Comm. Heat Mass Trans.. - 2005. - 32. - pp. 612-619.
- [93]. **Lim L.C. [et al.]** Derivation of new drying model from theoretical diffusion controlled drying period [Conférence] // 14th International Drying Symposium. - Sao Paulo : [s.n.], 2004. - Vol. A. - pp. 430-435.
- [94]. **Lin L. [et al.]** Heat transfer characteristics of spray cooling in a closed loop [Revue] // Int. J. Heat Mass Transfer. - 2003. - 46. - pp. 3737-3746.
- [95]. **Louka N.** Maîtrise de la qualité des produits agro-alimentaires séchés; modification texturale et réduction du coût énergétique par détente instantanée contrôlée (DIC) vers le vide. Conception et réalisation d'un nouveau procédé industriel. // Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Compiègne. - 1996.
- [96]. **Loureiro H.M. [et al.]** Simultaneous measurements of droplet characteristics and surface thermal behaviour to study spray cooling with

- pulsed sprays [Conférence] // 12th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. - Lisbonne : [s.n.], 2004.
- [97]. **Lucisano M.F.L.** On the mechanism of heat transfer with phase change during impulse pressing of paper [Rapport] : Licentiate Thesis / Royal Institute of Technology-Department of Pulp and Paper Chemistry and Technology. - Stockholm : [s.n.], 2000.
- [98]. **Lukashov V.V. [et al.]** On the Determination of the Surface Temperature of an Evaporating Liquid [Revue] // Theoret. Found. Chem. Eng. - 2002. - 4 : Vol. 37. - pp. 325-329.
- [99]. **Majaron B. [et al.]** Intermittent cryogen spray cooling for optimal heat extraction during dermatologic laser treatment [Revue] // Phys. Med. Biol.. - 2002. - 47. - pp. 3275-3288.
- [100]. **Majaron Boris [et al.]** Cryogen Spray Cooling in Laser Dermatology: Effects of Ambient Humidity and Frost Formation [Revue] // Lasers in Surgery and Medicine. - 2001. - 28. - pp. 469-476.
- [101]. **Mariotti M. [et al.]** Effect of puffing on ultrastructure and physical characteristics of cereal grains and flours [Revue]. - 2006. - 43. - pp. 47-56.
- [102]. **Maroulis Z.B. [et al.]** A structural generic model to predict the effective thermal conductivity of fruits and vegetables during drying [Revue] // J. Food Eng.. - 2002. - 52. - pp. 47-52.
- [103]. **Maroulis Z.B. [et al.]** Heat and mass transfer modeling in air drying of foods [Revue] // J. Food Eng.. - 1995. - 26. - pp. 113-130.
- [104]. **Marzo M. Di [et al.]** Evaporative Cooling Due to a Sparse Spray [Revue] // Fire Safety J.. - 1996. - 27. - pp. 289-303.
- [105]. **Maskan M. [et al.]** Microwave/air and microwave finish drying of banana [Revue] // J. Food Eng.. - 44. - pp. 71-78.
- [106]. **Maslov E.M. [et al.]** A new equation describing the bubble expansion in metastable media [Revue] // Physics Letters A. - 2001. - 286. - pp. 407-409.
- [107]. **Mayor L. [et al.]** Modelling shrinkage during convective drying of food materials a review [Revue] // J. Food Eng.. - 2004. - 61. - pp. 373-386.
- [108]. **Mellouk H.** Extraction des volatils à partir du bois par détente instantanée contrôlée [Rapport] : Thèse / Université de La Rochelle. - La Rochelle : [s.n.], 2007.
- [109]. **Mendonça S.L.R. [et al.]** Transient conduction in spherical fruits: method to estimate the thermal conductivity and volumetric thermal capacity [Revue] // J. Food. Eng.. - 2005. - 67. - pp. 261-266.
- [110]. **Milosavljevic N. [et al.]** A comprehensive approach to cooling tower design [Revue] // App. Therm. Eng.. - 2001. - 21. - pp. 899-915.

- [111]. **Miyatake O. [et al.]** Transient characteristics and performance of a novel desalination system based on heat storage and spray flashing [Revue] // Desalination. - 2001. - 137. - pp. 157-166.
- [112]. **Miyatake O. [et al.]** Transient Characteristics and performance of hybrid latente heat storage and spray flash evaporation system [Revue] // J. Chem. Eng. Japan. - 1997. - pp. 1076-1082.
- [113]. **Miyatake O.** Comparative study of flash evaporation rates [Revue] // Desalination. - 1994. - 96. - pp. 163-171.
- [114]. **Moran M.J.** Engineering thermodynamics [Livre] / éd. Kreith Frank. - [s.l.] : CRC Press, 1999.
- [115]. **Moreira A.L.N. [et al.]** An experimental methodology to quantify the spray cooling event at intermittent spray impact [Revue] // Int. J. Heat Fluid Flow. - 2007. - 28. - pp. 191-202.
- [116]. **Mounir S.** Etude de nouveaux procédés de fabrication de poudres par insertion de la technologie de détente instantanée contrôlée (DIC), dans les processus d'atomisation et de broyage couplé au séchage / texturation de produits laitiers [Rapport] / Université de La Rochelle. - La Rochelle : [s.n.], 2007.
- [117]. **Mujumdar A.S. et Devehastin S.** Fundamental Principles of drying [Section du livre] // Mujumdar's practical guide to industrial drying / auteur du livre Mujumdar A.S.. - [s.l.] : Exergex Corp, 2000. - ISBN 974-85913-9-5.
- [118]. **Muthunayagam A.E. [et al.]** Modelling and experiments on vaporization of saline water at low temperatures and reduced pressures [Revue] // App. Therm. Eng.. - 2005. - 25. - pp. 941-952.
- [119]. **Naidenov V.I. [et al.]** Nonlinear Phenomena in Evaporating Thin Liquid Film Flow [Revue] // Doklady Chemistry. - 2002. - 5 : Vol. 382. - pp. 660-662.
- [120]. **Nelson L.S. [et al.]** Photographic evidence for the mechanism of explosion experiments [Revue] // J. Non-Equil. Thermodyn.. - 1988. - 13. - pp. 27-55.
- [121]. **Ogle R.A. [et al.]** Explosion caused by flashing liquid in a process vessel [Revue] // J. Haz. Mat.. - 2004. - 115. - pp. 133-140.
- [122]. **Park H.-C. [et al.]** Explosive boiling of liquid droplets at their superheat limits [Revue] // Chem. Eng. Sci.. - 2005. - 60. - pp. 1809-1821.
- [123]. **Pasandideh-Fard M. [et al.]** Cooling effectiveness of a water drop impinging on a hot surface [Revue] // Int. J. Heat Fluid Flow. - 2001. - 22. - pp. 201-210.
- [124]. **Peczalski R. [et al.]** Transfert dans les aliments solides- Modèles physiques et mathématiques [Article] // Techniques de l'ingénieur. - [s.l.] : Techniques de l'ingénieur. - F2000 : Vol. Agroalimentaire.



- [125]. **Peczalski R. et Laurent M.** Transfert dans les aliments solides- Outils simplifiés de calcul [Article] // Techniques de l'ingénieur.- [s.l.] : Technique de l'ingénieur. - F2005 : Vol. Agroalimentaire.
- [126]. **Perepezko J.H. [et al.]** Undercooling and solidification of atomized liquid droplets [Revue] // Math. Sci. Eng. A. - 2002. - 326. - pp. 144-153.
- [127]. **Peterson R.J. [et al.]** Investigations of liquid flashing and evaporation due to sudden depressurization [Revue] // Int. J. Heat Mass Transfer. - 1984. - 2 : Vol. 22. - pp. 301-310.
- [128]. **Pikkula B. M. [et al.]** Effects of Droplet Velocity, Diameter, and Film Height on Heat Removal during Cryogen Spray Cooling [Revue] // Annals Biomedic. Eng.. - 2004. - 8 : Vol. 32. - pp. 1131-1140.
- [129]. **Planas-Cuchi E. [et al.]** Calculating overpressure from BLEVE explosions [Revue] // J. Loss Prev. Process Ind.. - 2004. - 17. - pp. 431-436.
- [130]. **Planas-Cuchi E. [et al.]** Explosion of a road tanker containing liquified natural gas [Revue] // J. Loss Prev. Process Ind.. - 2004. - 17. - pp. 315-321.
- [131]. **Prigogine I.** Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles [Livre]. - [s.l.] : Jacques Gabay, 1996. - pp. 15-42. - ISBN 2-87647-169-8.
- [132]. **Rahman M.S. [et al.]** An improved thermal conductivity prediction model for fruits and vegetables as a function of temperature, water content and porosity [Revue] // J. Food Eng.. - 1997. - 31. - pp. 163-170.
- [133]. **Rakatozafy H.D.** Application du nouveau procédé de déshydratation par détentes successives (DDS), dans le séchage de produits biologiques à haute valeur ajoutée // Thèse de doctorat- Université de La Rochelle. - La Rochelle : [s.n.], 2001.
- [134]. **Reinke P. [et al.]** Explosive vaporization of superheated liquids by boiling fronts [Revue] // Int. J. Multiphase Flow. - 2001. - 27. - pp. 1487-1516.
- [135]. **Rezzoug S.A. [et al.]** Effect of instantaneous controlled pressure drop process on the hydration capacity of scleroglucan: optimisation of operating conditions by response surface methodology [Revue] // Carbohydrate polymers. - 2000. - 42. - pp. 73-84.
- [136]. **Richardson P.** Thermal technologies in food processing [Livre]. - [s.l.] : Woodhead publishing and CRC Press, 2001. - pp. 178-208. - ISBN 1-8493-1216-7.
- [137]. **Robidou H. [et al.]** Controlled cooling of a hot plate with a water jet [Revue] // Exp. Therm. Fluid Sci.. - 2002. - 26. - pp. 123-129.
- [138]. **Robinson A.J. [et al.]** The dynamics of spherical bubble growth [Revue] // Int. J. Heat Mass Transfer. - 2004. - 47. - pp. 5101-5113.

- [139]. **Ruiz-Lopez I.I. [et al.]** Moisture and temperature evolution during food drying effect of variable proper [Revue] // J. Food Eng. . - 2004. - 63. - pp. 117-124.
- [140]. **Ryynanen S. [et al.]** The electromagnetic properties of food materials: a review of the basic principles [Revue] // J. Food Eng.. - 1995. - 26. - pp. 409-429.
- [141]. **Sa M.M. [et al.]** Glass transitions and state diagrams for fresh and processed apple [Revue] // Thermochemica Acta. - 1999. - 329. - pp. 31-38.
- [142]. **Sahyoun W.** Maîtrise de l'aptitude de matériaux agro-alimentaires aux procédés de séchage. Etude de l'adéquation entre les états structuraux, biochimiques, physiques et comportementaux sur les processus de déshydratation [Rapport]: Thèse / Université de Technologie de Compiègne. - Compiègne : [s.n.], 1996.
- [143]. **Sakai N. [et al.]** A method for developing model food system in microwave heating studies [Revue] // J. Food Eng.. - 2005. - 66. - pp. 525-531.
- [144]. **Salla J. M. [et al.]** BLEVE: a New Approach to the Superheat Limit Temperature [Revue] // J. Loss Prev. Process Ind.. - 2004.
- [145]. **Sanya E.** Analyse du traitement hydro-amido-thermique de bois gorgé d'eau; application à la restauration-préservation du bois archéologique. // Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle.. - 2000.
- [146]. **Saravacos G.D. [et al.]** Engineering properties in food processing simulation [Revue] // Computers Chem. Engng. - 1996. - Vol. 20. - pp. 461-466.
- [147]. **Satoh I. [et al.]** Freezing of water droplet due to evaporation - heat transfer dominating the evaporation- freezing phenomena and the effect of boiling on freezing characteristics [Revue] // Int. J. Refrigeration. - 2002. - 25. - pp. 226-234.
- [148]. **Saury D. [et al.]** Flash evaporation from a water pool: Influence of the liquid height and of the depressurization rate [Revue] // Int. J. Therm. Sci.. - 2005. - 44. - pp. 953-965.
- [149]. **Saury D.** Etude expérimentale de l'évaporation flash d'un film d'eau [Thèse de doctorat]. - 2003.
- [150]. **Schwartzberg H.G. [et al.]** Modelling deformation and flow during vapor induced puffing [Revue] // J. Food Eng.. - 1995. - 25. - pp. 329-372.
- [151]. **Sebastian P. [et al.]** Experiments and modeling of falling jet flash evaporators for vintage treatment [Revue] // Int. J. Therm. Sci.. - 2002. - 41. - pp. 269-280.
- [152]. **Shin H.T. [et al.]** Spherical-shaped ice particle production by spraying water in a vacuum chamber [Revue] // Applied Thermal Engineering. - 2000. - 20. - pp. 439-454.

- [153]. **Shirvill L.C. [et al.]** Efficacy of water spray protection against propane and butane jet fires impinging on LPG storage tanks [Revue] // J. Loss Prev. Process Ind.. - 2004. - 17. - pp. 111-118.
- [154]. **Shusser M. [et al.]** Explosive boiling of a liquid droplet [Revue] // Int. J. Multiphase Flow. - 1999. - 25. - pp. 1561-1573.
- [155]. **Shusser M. [et al.]** Kinetic theory analysis of explosive boiling of a liquid droplet [Revue] // Fluid Dynamics research. - 2000. - 27. - pp. 353-365.
- [156]. **Shusser M. [et al.]** Stability of rapidly evaporating droplets and liquid shells [Revue] // Int. J. Multiphase Flow. - 2001. - 27. - pp. 299-345.
- [157]. **Silva A.C.S. Baptista da [et al.]** Spray vaporization for evaporative cooling of buildings [Conférence] // Eighth International IBPSA Conf. - Eindhoven, Netherlands : [s.n.], 2003. - pp. 1209-1216.
- [158]. **Sjoholm I. [et al.]** Apple shrinkage upon drying [Revue] // J. Food Eng.. - 1995. - 25. - pp. 123-130.
- [159]. **Splegler K.S. [et al.]** The energetics of desalination processes [Revue] // Desalination. - 2001. - 134. - pp. 109-128.
- [160]. **Stawczyk J. [et al.]** Experimental evaluation of LPG tank explosion hazards [Revue] // J. Hazardous Materials. - 2003. - 96 : Vol. B. - pp. 189-200.
- [161]. **Stephan P. [et al.]** Evaluation of heat and mass transfer phenomena in nucleate boiling [Revue] // Int. J. Heat Fluid Flow. - [s.l.] : Elsevier, 2004. - 25. - pp. 140-148.
- [162]. **Strub M. [et al.]** Experimental study and modelling of the crystallization of a water droplet [Revue] // Int. J. Refrigeration. - 2003. - 26. - pp. 59-68.
- [163]. **Svaasand L.O. [et al.]** Cooling Efficiency of Cryogen Spray During Laser Therapy of Skin [Revue] // Lasers in Surgery and Medicine. - 2003. - 32. - pp. 137-142.
- [164]. **Talla A. [et al.]** Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana [Revue] // J. Food Eng.. - 2004. - 64. - pp. 103-109.
- [165]. **Thai-Cong D.** Etude de l'application du procédé hydrothermique dans le traitement de différents types de riz : procédé d'étuvage et micro-expansion par détente instantanée contrôlée et impact sur les propriétés fonctionnelles [Rapport] : Thèse / Université de La Rochelle. - La Rochelle : [s.n.], 2002.
- [166]. **Thuery J.** Les Micro-ondes et leurs effets sur la matière. 2ème édition [Livre]. - [s.l.] : Lavoisier, 1999. - 2ème édition.
- [167]. Transport phenomena in food processing [Livre]. - [s.l.] : CRC Press, 2003. - pp. Chapitre 1-3.

- [168]. **Vachet F.** Séchage dans l'industrie chimique [Article] // Techniques de l'ingénieur. - [s.l.] : Techniques de l'ingénieur. - J2483 : Vol. Génie des Procédés.
- [169]. **Varnalis A.I. [et al.]** A proposed mechanism of high-temperature puffing of potato. Part II: Influence of blanching and initial drying on the permeability of the partially dried layer to water vapor [Revue] // J. Food Eng.. - 2001. - 48. - pp. 369-378.
- [170]. **Varnalis A.I. [et al.]** Optimisation of high temperature puffing of potato cubes using response surface methodology [Revue] // J. Food Eng.. - 2004. - 61. - pp. 153-163.
- [171]. **Waananen K.M. [et al.]** Effect of porosity on moisture diffusion during drying of pasta [Revue] // J. Food Eng.. - 1996. - 28. - pp. 121-137.
- [172]. **Wang N. [et al.]** A mathematical model of simultaneous heat and moisture transfer during drying of potato [Revue] // J. Food Eng.. - 1995. - 24. - pp. 47-60.
- [173]. **Watanabe T. [et al.]** A mechanistic model for the analysis of flashing phenomena [Revue] // Ann. Nucl. Energy. - 1996. - 10 : Vol. 23. - pp. 801-811.
- [174]. **Wilhelm L.R. [et al.]** Drying and dehydration [Section du livre] // Food and process engineering technology. - [s.l.] : American society of agriculture engineers, 2004.
- [175]. **Willix J. [et al.]** Additional thermal conductivity values of foods measured by a guarded hot plate [Revue] // J. Food Eng.. - 1998. - 37. - pp. 159-174.
- [176]. **Winterbone D.E.** Advanced thermodynamics for engineers [Livre]. - [s.l.] : John Wiley & Sons, 1997. - pp. 3-40.
- [177]. **Woods A. [et al.]** Modeling of Flash Evaporation I:Formulation of the Mathematical Model [Revue] // Math. Comput.Modelling. - 2000. - 32. - pp. 1153-1169.
- [178]. **Woods A. [et al.]** Modelling of Flash Evaporation II:Numerical Solutions of the Model Equations [Revue] // Math. Comput.Modelling. - 2001. - 33. - pp. 385-406.
- [179]. **Woods A.** Mathematical modelling and analysis of flash evaporation [Thèse] // Mathematical modelling and analysis of flash evaporation. - Illinois : Dekalb, Illinois, 1998.



## **Liste des figures**



## Liste de Figures

Figure I-1	Schéma d'ébullition explosive d'une gouttelette	10
Figure I-2	Photos de l'appareillage	15
Figure I-3	Appareillage d'expérimentation. (1) Réservoir à vide ; (2) Enceinte de traitement ; (3) Pompe à vide ; (4) Vanne Electromagnétique ; (5) Plaque chauffante ; (6) Vanne de mise à l'air libre ; (7) Réservoir d'eau distillée ; (8) Caméra CCD ; (9) Système d'acquisition ; (10) Régulateur de température ; (11) Thermocouples ; (12) Vanne ; (13)(14) Capteur de pression ; (15) (16) Vanne de vidange ; (17) Vanne de control de débit (Saury, et al., 2005)	16
Figure I-4	(a) Appareillage de mesure, (b) Protocole d'injection et variation de la température de la surface, et du diamètre des gouttelettes en fonction du temps (Loureiro, et al., 2004)	18
Figure I-5	Variation temporel de la température et dimension des gouttelettes au cours d'un cycle (Moreira, et al., 2007)	19
Figure I-6	Sécheur de papier utilisant la technologie "Impulse drying"	20
Figure I-7	Schéma de la répartition des thermocouples à l'intérieur de la couche de papier : A) papier de 80g/m <sup>2</sup> et B) 500 g/m <sup>2</sup>	20
Figure I-8	Variation des températures à travers les diverses couches du papier : à gauche A (80g/m <sup>2</sup> ) et à droite B (500 g/m <sup>2</sup> )	21
Figure I-9	Schéma de l'appareillage expérimental	23
Figure I-10	Variation de la température de la surface en fonction temps pour une durée de pulvérisation de 70 ms et une distance de 20 mm	24
Figure I-11	Variation de la température de la surface en fonction du temps pour des durées de pulvérisation allant de 10 à 100 ms pour une distance de 20 mm (Aguilar, et al., 2003)	24
Figure I-12	Variation de la température de la surface pulvérisée en fonction de la durée de pulvérisation : A gauche pour une distance de 20mm et à droite pour une distance de 50mm (Aguilar, et al., 2003)	25
Figure I-13	Variation de la quantité de chaleur évacuée par unité de surface en fonction du temps : A gauche pour une distance de 20 mm et à droite pour une distance de 50 mm (Aguilar, et al., 2003)	26
Figure I-14	Variation de la teneur en eau du produit en fonction du temps lors du séchage par entraînement (Besson, et al., 2000)	39
Figure I-15	Variation de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau du produit (Besson, et al., 2000)	39



Figure I-16	Modèle mixte de la conductivité thermique	43
Figure I-17 :	Spectre des ondes électromagnétiques. A droite, on donne les sources typiques. (Thuery, 1999)	49
Figure I-18 :	Applications du traitement par microondes	51
Figure II-1	Exemple de Transfert de Chaleur selon la loi de Fourier, Conduction entre deux matériaux solides en contact ( $T_1 > T_2$ )	56
Figure II-2	Exemple de transfert de masse selon les lois de Fick, Mélange de deux gaz différents	56
Figure II-3	Variation de la température de la gouttelette d'eau lors d'une détente quasi-statique	60
Figure II-4	Variation de la température de la gouttelette lors d'une détente instantanée	61
Figure II-5	Variation de la température de la gouttelette d'eau en fonction de la pression initiale et de la pression finale.	64
Figure II-6	Variation de l'écart de température ( $T_s - T_e$ ) entre la température minimale atteinte et celle de l'équilibre en fonction des conditions initiales et finales	65
Figure II-7	Variation de la température de la gouttelette d'eau en fonction du temps suite à une détente instantanée (Exemple : Détente instantanée d'une pression initiale de 5 bars (425K) vers une pression finale de 50 mbars (306 K))	67
Figure II-8	Le passage d'un système d'un état initial A vers un état final C : Passage direct selon le chemin 1 (transformation quasi-statique) ou indirect en passant par un état intermédiaire B selon les chemins 1' puis 2'.	69
Figure II-9	Variation de la conductivité thermique des produits biologiques au cours du séchage	80
Figure II-10	Schéma des transferts lors du séchage	83
Figure III-1	Schéma du dispositif expérimental de l'étude de l'instantanéité	92
Figure III-2	A gauche : Schéma du système PASCOTD 85 65 ; A droite : Schéma détaillé du piston de compression	93
Figure III-3	Schéma de l'enceinte de traitement: 1) Électrovannes à ouvertures instantanées, 2) Connexion avec PASCOTD 8565, 3) Tube en plexiglas, 4) Entrée thermocouple, 5) Système vis et écrous, 6) Support amovible, 7) Support fixe	94
Figure III-4	Schéma thermocouple et disposition de la gouttelette d'eau	94

Figure III-5	, C1 est la variation de la température de la gouttelette d'eau, C2 est la variation de la pression de l'enceinte de traitement et C3 la variation de la température de saturation ; ET1 est la période de mise sous haute pression, ET2, la période de maintien sous haute pression et ET3 la période de détente vers la basse pression	96
Figure III-6	Variation de la température de la gouttelette d'eau lors d'une détente lente (décompression) C1 est la variation de la température de la gouttelette, C2 la variation de la pression de l'enceinte de traitement et C3 la variation de la température de saturation	98
Figure III-7	Variation de la température de la gouttelette d'eau en fonction du temps (Détente instantanée et détente quasi-statique)	100
Figure III-8	CT1 : Transformation quasi statique ; CT2 : Transformation instantanée réelle ; CT3 : Transformation Instantanée Théorique	100
Figure III-9	Principe de la DIC	103
Figure III-10	A gauche : Photos DIC-MP, A droite : présentation schématique du réacteur DIC utilisé (1: Chambre de traitement; 2: valve de détente abrupte; 3: Réservoir à vide; A: générateur de vapeur; B: condenseur; C: pompe à vide).	104
Figure III-11	Schéma du cycle de DDS ( $P_h$ -Pression haute, $P_b$ -Pression basse, $D_{ph}$ -Durée du palier haut, $D_{pb}$ -Durée du palier bas)	107
Figure III-12	Schéma du réacteur DDS (1-cloche; 2-base fixe de la chambre de traitement; 3 : système de fermeture; 4-vanne de détente; 5- vérin; 6-manomètres; 7- entrée de vapeur; 8- entrée de gaz; 9-entrée d'eau dans la double enveloppe; 10- sortie d'eau dans la double enveloppe; 11- vers la pompe à vide)	108
Figure III-13:	Schéma général du réacteur à Pulvérisation Contrôlée sous Vide (Vacuum Controlled Spraying reactor VCS).	111
Figure III-14:	Photo de l'équipement expérimental.	112
Figure III-15:	Schéma d'appareillage de mesure du dispositif expérimental.	113
Figure III-16	Les cinq niveaux d'un plan d'expériences à deux facteurs	117
Figure III-17	Les effets de la pression et du temps de traitement sur le taux d'expansion	123
Figure III-18	Variation du taux d'expansion de la pomme en fonction de la pression et du temps de traitement	123
Figure III-19	Histogramme de Pareto	124

Figure III-20	Les effets de la pression et du temps de traitement sur le taux d'expansion	125
Figure III-21	Variation du taux d'expansion de la pomme en fonction de la pression initiale et du temps de traitement	125
Figure III-22	Histogramme de Pareto	126
Figure III-23	Cinétique de séchage de la pomme par air chaud à 45°C : Effet de la non-instantanéité	127
Figure III-24	Variation du taux d'expansion des produits suite au traitement DIC	130
Figure III-25	Cinétiques de séchage de la pomme en bâtonnet	132
Figure III-26	Cinétiques de séchage des courgettes en rondelles	132
Figure III-27	Cinétiques de séchage de l'oignon en lamelles	132
Figure III-28	Cinétiques de séchage de la patate douce en tranche	133
Figure III-29	Exemples de cinétique de séchage des différents fruits et légumes en morceaux selon les modèles adoptés	134
Figure III-30	Exemple de comparaison des cinétiques de séchage de la pomme DIC1 (DDS-ATM, DDS-VAC et Air chaud 45°C)	142
Figure III-31	Exemple de comparaison des cinétiques de séchage de la pomme DIC1(DDS-ATM, DDS-VAC , Air chaud 45°C et microondes (720 W))	146
Figure IV-1	Système de pores dans le produit	154

## **Liste des tableaux**



## Liste des Tableaux

Tableau I-1	Les différents paramètres étudiés par différents auteurs	17
Tableau I-2	Propriétés thermiques des composantes de l'appareillage ainsi que celles de l'épiderme à titre de comparaison	23
Tableau I-3	Constantes des équations modifiées de Henderson et de Halsey (Wilhelm, et al., 2004)	34
Tableau I-4	Principales formules de détermination de la conductivité thermiques des produits biologiques	44
Tableau II-1	Tableau de variation de $T_s$ en fonction de $P_i$ et $P_f$	62
Tableau II-2	Variation du temps nécessaire pour atteindre 99,7% de l'équilibre thermique et l'augmentation du rayon de la gouttelette en fonction de $T_s$ ( $P_i=500$ kPa, $T_i= 425$ K ; $P_f= 5$ kPa, $T_f= 306$ K)	68
Tableau III-1	Résultats de traitement d'une gouttelette d'eau	97
Tableau III-3	Paramètres opératoires : Effets Thermomécanique et Mécanique	121
Tableau III-4	Paramètres opératoires : Effets Thermomécanique (Température)	121
Tableau III-5	Résultats effet thermomécanique	122
Tableau III-6	Résultats traitement mécanique	124
Tableau III-7	Effet de la vitesse de détente	127
Tableau III-8	Conditions opératoires de traitement DIC	131
Tableau III-9	Pomme : résultats première intensification du séchage	134
Tableau III-10	Oignon : résultats première intensification du séchage	135
Tableau III-11	Patate douce : résultats première intensification du séchage	135
Tableau III-12	Courgettes : résultats première intensification du séchage	135
Tableau III-13	Conditions opératoires de traitement DDS vers la pression atmosphérique	137
Tableau III-14	Plan d'expériences DDS-ATM	137
Tableau III-15	Conditions opératoires DDS-VAC	137
Tableau III-16	Résultats du traitement de la pomme par DDS vers la pression atmosphérique (DDS-ATM)	138
Tableau III-17	Résultats du traitement de l'oignon par DDS vers la pression atmosphérique	139
Tableau III-18	Résultats du traitement de la pomme vers le vide par DDS (DDS-VAC)	139

Tableau III-19	Résultats du traitement de l'oignon par DDS vers le vide (DDS-VAC)	139
Tableau III-20	Résultats du traitement de la pomme par DDS (Instantané et non-instantané)	140
Tableau III-21	Résultats du traitement de l'oignon par DDS (Instantané et non-instantané)	141

# **Index**





# Index

## A

- Abruptei, 7, 8, 13, 14, 18, 29, 30, 31, 32, 55, 57, 58, 69, 75, 76, 77, 103, 104, 105, 106, 109, 133, 134, 178, 221  
Adiabatique ..... iv, 14, 57, 91, 92  
Aguilar G. .... 74, 161, 177  
Al-Haddad M. .... 161, 162  
Allaf K.i, iv, 28, 33, 55, 56, 57, 58, 61, 81, 100, 149, 162, 221  
Analyseii, iii, iv, v, vi, iv, v, vi, 1, 3, 7, 14, 32, 33, 39, 63, 55, 56, 58, 61, 70, 71, 73, 77, 90, 92, 93, 95, 91, 105, 116, 120, 122, 125, 130, 132, 148, 150, 149, 162, 164, 165, 166, 167, 172, 221  
Analyses ..... 2, 117, 127  
Andreev S.N. .... 162  
Aoki I. .... 58, 163  
Applicationi, ii, iii, iv, v, 1, 7, 9, 19, 24, 28, 31, 33, 34, 54, 56, 59, 61, 55, 116, 152, 155, 149, 161, 162, 164, 167, 169, 171, 173, 174, 177, 221  
Autovaporisationi, iii, iv, vi, vii, II, i, ii, iii, iv, v, vi, 1, 7, 13, 15, 18, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 63, 65, 55, 58, 59, 60, 62, 74, 75, 76, 80, 90, 91, 92, 93, 91, 99, 100, 103, 104, 108, 109, 131, 134, 135, 148, 149, 150, 151, 152, 154, 155, 221  
Avksentyuk B.P. .... 163

## B

- Bai Y. .... 163  
Becker B.R. .... 163  
Berg A.C. van den. .... 163  
Berg C-G ..... 163  
Besson A. .... 163, 177  
Birk A.M. .... 163  
BLEVEi, iii, iv, 12, 13, 14, 76, 149, 150, 160, 163, 164, 166, 172, 221  
Bloom F. .... 163

- Bonazzi C. .... 163  
Buyevich Y.A. .... 163

## C

- Campos F.B. .... 163  
Capteur ..... 17, 93, 95, 113, 115, 177  
Carmeliet J. .... 164  
Casal J. .... 14, 164  
Chaleurii, iv, I, II, i, iii, 1, 2, 3, 6, 7, 9, 13, 18, 19, 27, 28, 30, 36, 39, 41, 42, 44, 45, 46, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 56, 57, 59, 60, 65, 67, 68, 75, 79, 80, 83, 84, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 98, 108, 110, 142, 152, 159, 177, 221  
Charreau A. .... 164  
Chen H-J. .... 164  
Chen R.-H. .... 164  
Chen X.D. .... 164  
Cinétiqueii, iii, v, vi, i, 34, 40, 41, 53, 58, 60, 61, 62, 63, 86, 88, 116, 117, 118, 119, 124, 132, 133, 136, 137, 138, 139, 140, 143, 145, 149, 150, 151, 152, 155, 151, 152, 179, 213, 217  
Clérac R. .... 164  
Conclusion ..... ii, 32  
ConductivitéIV, 46, 47, 48, 49, 51, 56, 59, 84, 85, 87, 89, 142, 152, 177, 178, 183  
Conservation2, 5, 34, 35, 61, 156, 157, 163, 165  
Courgette ..... 136, 141, 153, 211  
Crank J. .... 82, 83, 164  
Cycleiii, V, 21, 30, 62, 90, 91, 93, 109, 110, 112, 113, 116, 119, 143, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 177, 178, 211

## D

- DDSi, iii, iv, v, vi, V, 1, ii, iv, v, 30, 32, 34, 59, 60, 61, 62, 63, 58, 90, 91, 92, 93, 91, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 120,

142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 155, 156, 150, 151, 152, 153, 171, 178, 179, 184, 211	155, 156, 157, 158, 159, 172, 173, 177, 178, 183, 197, 201, 221
Debs-Louka E..... 164	Elias E. .... 165
Délamination..... 21, 22, 24, 103, 150, 154	Elustondo M.P. .... 165
Déshydratationi, ii, v, vi, vii, 1, i, ii, iv, v, 30, 32, 34, 36, 58, 88, 90, 93, 108, 123, 136, 137, 142, 143, 150, 151, 149, 151, 152, 154, 171, 172	Enceinte de traitement57, 93, 94, 95, 96, 97, 100, 111, 112, 114, 127, 178
Détentei, iii, iv, vi, V, 1, i, ii, iii, iv, 15, 16, 17, 18, 30, 31, 32, 60, 62, 63, 55, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 65, 66, 68, 69, 70, 73, 74, 75, 86, 90, 91, 92, 91, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 123, 124, 131, 132, 133, 134, 135, 143, 145, 147, 148, 149, 150, 149, 150, 151, 152, 159, 166, 168, 169, 170, 171, 174, 177, 178, 183, 221	Entropieii, iii, II, 2, 3, 5, 6, 7, 57, 58, 61, 62, 63, 66, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 100, 101, 103, 104, 134, 149, 150
Diaphragme107, 108, 132, 134, 145, 148	Equation4, 12, 57, 60, 63, 68, 75, 82, 83, 117, 156, 157, 158, 175
DICi, ii, iv, v, vi, 1, i, ii, iv, v, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 60, 55, 80, 84, 86, 89, 91, 102, 103, 104, 105, 106, 108, 109, 110, 112, 113, 114, 124, 125, 126, 127, 129, 131, 133, 135, 136, 137, 140, 141, 142, 143, 145, 146, 147, 148, 150, 153, 155, 150, 151, 154, 161, 164, 166, 168, 169, 170, 174, 178, 179, 183, 211, 212, 221	Equilibreii, iii, I, III, iv, 1, 3, 4, 5, 7, 23, 32, 36, 41, 42, 52, 56, 57, 59, 61, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 82, 91, 92, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 103, 104, 110, 134, 149, 150, 157, 178, 183, 221
DiffusionI, V, ii, 24, 37, 38, 39, 42, 44, 50, 51, 81, 82, 83, 133, 134, 164, 168, 175	Etapeiv, 1, 33, 53, 59, 69, 85, 89, 90, 91, 96, 105, 109, 124, 143, 150, 151, 155, 150, 152, 153, 178, 221
Donsi G..... 165	Etudeiii, i, iii, iv, v, vi, 1, 3, 9, 10, 16, 18, 19, 23, 24, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 40, 51, 58, 59, 60, 61, 62, 65, 55, 57, 58, 77, 90, 92, 91, 92, 95, 97, 102, 103, 110, 111, 116, 120, 150, 149, 150, 151, 152, 154, 159, 162, 167, 170, 172, 173, 174, 178, 221
<b>E</b>	Etuve ..... 117
Ealre R.L. .... 165	Expansioniv, v, vii, IV, i, iv, 14, 22, 28, 29, 32, 55, 84, 85, 86, 87, 102, 103, 104, 118, 119, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 140, 147, 152, 155, 151, 152, 154, 159, 162, 163, 169, 174, 177, 179
Eauii, iii, v, I, II, III, IV, i, ii, iii, 9, 16, 17, 18, 21, 23, 29, 30, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 58, 60, 61, 62, 63, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 65, 66, 69, 70, 72, 73, 74, 75, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 91, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 109, 110, 111, 116, 118, 119, 124, 125, 131, 134, 135, 136, 147, 151, 155, 149, 151, 152, 153,	Expérimentationi, iv, vi, 7, 17, 95, 123, 124, 177
	Externe ..... ii, 8, 42, 45, 46, 52, 53, 80
	<b>F</b>
	Facteurii, vi, 18, 37, 38, 39, 47, 55, 58, 89, 92, 121, 122, 142, 147, 149, 151, 152, 179
	Fard M.B. .... 165
	Fath H.E.S. .... 165

- Fick..... 50, 56, 81, 177
- Figurevii, 11, 16, 17, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 43, 44, 47, 53, 54, 56, 61, 62, 66, 69, 72, 85, 89, 92, 93, 94, 97, 100, 101, 102, 105, 106, 109, 111, 113, 114, 115, 116, 121, 126, 128, 129, 130, 131, 133, 136, 138, 139, 140, 149, 155, 154, 155, 176, 177, 178, 179
- Flashi, ii, iii, 10, 13, 15, 16, 18, 21, 22, 58, 163, 165, 166, 167, 170, 173, 175, 221
- Fondamentaleiii, iv, v, 32, 63, 55, 73, 77, 79, 86, 90, 92, 95, 97, 149, 151, 152, 159, 160, 162
- Fontana A.J..... 165
- Fourrier ..... 56, 84
- Fruit ..... 161
- Fruitsii, v, vi, 35, 46, 47, 49, 63, 79, 80, 86, 87, 110, 112, 117, 118, 119, 120, 123, 124, 125, 140, 150, 155, 151, 169, 170, 171, 174, 179
- Funebo T..... 58, 165
- G**
- Genin N..... 165
- Giri A..... 166
- Gong Y.W..... 166
- Goutteiii, I, II, 9, 10, 11, 12, 31, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 72, 73, 74, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 149, 177, 178, 183
- Gradientii, 36, 39, 42, 50, 51, 59, 79, 81, 84, 88, 89, 90, 93, 142, 150, 151, 155, 152, 153
- H**
- Hahne E..... 166
- Hao Y..... 166
- Harigel G.G..... 166
- Harvie D.J.E..... 166
- Hiérarchie..... 57, 77
- Hill J.M..... 58, 166
- Hsieh S.-S..... 166
- Humiditév, ii, 23, 29, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 47, 48, 52, 55, 91, 93, 105, 110, 117, 118, 123, 126, 131, 132, 137, 139, 140, 142, 145, 149, 151, 152, 155
- I**
- Ikegama Y..... 166
- Impulse dryingii, iii, 21, 22, 23, 103, 150, 154, 163, 169, 177
- Instantané..... 1, 148, 184
- Instantanéiii, iv, 1, i, ii, iii, iv, v, 7, 13, 14, 18, 32, 55, 57, 58, 59, 61, 62, 66, 68, 69, 70, 73, 74, 76, 77, 86, 90, 91, 92, 91, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 104, 106, 107, 110, 112, 131, 134, 135, 149, 150, 149, 152, 159, 166, 168, 169, 170, 174, 178, 221
- Instantanéité..... iv, 91, 133
- Intensificationiv, v, vi, v, 79, 85, 86, 89, 93, 105, 123, 124, 136, 137, 140, 141, 142, 143, 147, 150, 151, 155, 151, 152, 153, 183, 184
- Interneii, iv, 2, 22, 38, 39, 42, 45, 46, 49, 53, 80, 83, 86, 87, 89, 93, 115, 124, 142, 151, 152, 159, 162
- Irudayaraj ..... 166
- Ivashnev O. E. .... 167
- J**
- Jernqvist A. .... 167
- Jia W. .... 167
- Jin W.X. .... 167
- Juhel F..... 62, 167
- K**
- Kalogirou S.A. .... 167
- Karapetian E. .... 167
- Khabeev N.S. .... 167
- Kim B.S. .... 167
- Kim H. .... 167
- Kim J.-I..... 167
- Koshizuka S..... 168
- Kostaropoulos A.E..... 168
- Krokida M.K. .... 168

<b>L</b>	
Lee H.S. ....	168
Légumeii, v, vi, 29, 35, 46, 47, 79, 80, 86, 87, 110, 112, 117, 118, 119, 120, 123, 124, 125, 140, 150, 155, 151, 179	
Lewicki P.P. ....	168
Li H.164, 165, 166, 168, 170, 171, 172, 174, 175	
Lim L.C. ....	168
Lin L. ....	168
LOCA.....i, iii, iv, 14, 15, 76, 149, 150, 221	
Louka N. ....	168
Lukashov V.V. ....	169
<b>M</b>	
Ma O. ....	18
Majaron B. ....	169
Majaron Boris ....	169
Mariotti M. ....	169
Maroulis Z.B. ....	169
Marzo M. Di. ....	169
Maskan M. ....	169
Maslov E.M. ....	169
Massev, I, II, IV, iii, 12, 15, 17, 36, 39, 44, 46, 48, 51, 52, 58, 56, 60, 63, 65, 67, 72, 73, 75, 80, 81, 84, 86, 87, 89, 98, 99, 116, 117, 118, 119, 126, 131, 132, 136, 143, 151, 152, 156, 157, 158, 177, 209	
Matièreii, iv, III, IV, 1, i, ii, 1, 3, 7, 34, 38, 39, 40, 41, 42, 45, 46, 50, 52, 53, 54, 55, 57, 59, 80, 82, 83, 84, 85, 91, 92, 113, 124, 126, 133, 135, 136, 137, 140, 142, 143, 151, 152, 174, 221	
Mayor L. ....	169
Mécaniquevi, 3, 4, 13, 21, 28, 39, 57, 61, 74, 76, 77, 100, 110, 124, 125, 127, 129, 131, 162, 164, 168, 183	
Mécanisme ....	37, 38, 50, 53
Mendonça S.L.R. ....	170
Milosavljevic N. ....	170
Miyatake O. ....	58, 170
Moran M.J. ....	170
Morceauii, v, vi, 13, 29, 38, 46, 63, 79, 80, 86, 87, 110, 112, 117, 118, 119, 120, 123, 124, 125, 140, 150, 155, 151, 179	
Mujumdar A.S. ....	37, 170
Muthunayagam A.E. ....	170
<b>N</b>	
Naidenov V.I. ....	170
<b>O</b>	
Ogle R.A. ....	170
Oignon56, 123, 124, 136, 138, 139, 141, 146, 147, 148, 153, 179, 184	
<b>P</b>	
Paradoxe.....iv, 87, 89, 142	
Paramètreiii, 5, 17, 18, 26, 35, 47, 56, 57, 61, 62, 56, 57, 61, 74, 78, 101, 112, 115, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 132, 143, 145, 152, 150, 183	
Park H.-C. ....	171
Pasandideh-Fard M. ....	171
Patate douce123, 124, 136, 139, 141, 153, 179, 184, 211	
Peczalski R. ....	171
Perepezko J.H. ....	171
Période.....ii, 41, 42, 44, 45, 97, 155, 151	
Perspective.....vi, 57, 158, 154	
Peterson R.J. ....	14, 75, 171
Phasei, 1, 4, 7, 8, 9, 12, 16, 30, 37, 39, 42, 44, 57, 63, 57, 72, 74, 79, 81, 82, 87, 89, 91, 93, 100, 109, 136, 151, 155, 167, 169	
Phénomènei, ii, iii, iv, i, ii, iv, v, 1, 2, 7, 9, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 22, 24, 28, 30, 31, 33, 34, 37, 38, 39, 40, 43, 46, 47, 50, 53, 55, 56, 58, 61, 73, 76, 77, 79, 80, 81, 84, 85, 86, 91, 95, 97, 101, 103, 107, 108, 124, 134, 135, 136, 148, 149, 150, 154, 159, 221	
Pikkula B. M. ....	171
Planas-Cuchi E. ....	14, 171
Pomme38, 56, 103, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 133, 136, 137, 138, 139, 140, 145, 146, 147, 148, 149, 153, 155, 179, 183, 184	

Pressioniii, II, III, 1, i, ii, iii, iv, 3, 4, 7, 8, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 26, 29, 30, 31, 35, 36, 38, 39, 41, 42, 44, 45, 53, 61, 62, 63, 64, 55, 57, 59, 61, 62, 63, 65, 66, 69, 72, 74, 75, 76, 77, 79, 81, 85, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 92, 93, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 108, 109, 110, 112, 113, 115, 120, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 134, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 149, 150, 151, 155, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 159, 177, 178, ▪ 179, 184	Rakatozafy H.D. Rochelle :..... 58, 65, 171
Prigogine I..... 4, 171	Rapideiii, 8, 9, 10, 14, 16, 27, 38, 42, 44, 60, 62, 63, 112, 155
Prigogine, I..... 4, 171	Refroidissementi, iii, iv, 7, 9, 15, 16, 18, 19, 21, 24, 27, 29, 32, 55, 58, 62, 63, 72, 74, 75, 76, 86, 104, 106, 110, 114, 135, 149, 150, 151
Principei, ii, 1, 2, 5, 6, 31, 32, 77, 105, 113, 156, 158, 159, 178, 221	Reinke P..... 172
Procédéii, i, ii, iii, iv, v, 7, 15, 18, 19, 21, 24, 28, 30, 34, 45, 46, 53, 55, 60, 61, 62, 74, 79, 86, 106, 108, 109, 118, 123, 136, 150, 151, 160, 162, 165, 166, 167, 168, 170, 171, 172, 174	Réservoirv, iv, 12, 13, 17, 18, 25, 31, 76, 94, 106, 107, 110, 112, 113, 114, 177, 178
Processusi, ii, v, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 15, 18, 21, 28, 34, 36, 40, 55, 57, 58, 55, 75, 79, 80, 82, 87, 88, 90, 91, 92, 103, 110, 134, 135, 150, 149, 151, 152, 154, 159, 160, 162, 170, 171, 172, 221	Retraitii, i, 39, 40, 46, 47, 48, 50, 61, 80, 81, 84, 85, 86, 124, 136, 150, 151
Propriétéii, 1, 25, 29, 36, 44, 46, 51, 55, 56, 60, 65, 75, 86, 118, 134, 135, 142, 156, 174, 183, 197, 201, 209	Rezzoug S.A..... 60, 172
Pulvérisationii, iii, 8, 19, 25, 26, 27, 29, 31, 32, 55, 58, 74, 75, 113, 114, 115, 149, 151, 164, 177, 178	Richardson P..... 172
<b>q</b>	Robidou H..... 172
Qualitéii, iii, 15, 24, 28, 34, 35, 39, 40, 55, 59, 60, 61, 63, 80, 86, 102, 137, 142, 150, 155, 168	Robinson A.J..... 172
Quasi-statiquei, iii, iv, 4, 6, 31, 32, 55, 60, 61, 65, 71, 72, 73, 74, 92, 96, 97, 99, 101, 134, 148, 149, 150, 152, 178, 221	Ruiz-Lopez I.I..... 172
<b>R</b>	Ryynanen S..... 172
Rahman M.S..... 47, 171	<b>s</b>
	Sa M.M. .... 172
	Sakai N..... 58, 172
	Salla J. M..... 172
	Sanya E..... 172
	Saravacos G.D..... 173
	Satoh I..... 173
	Saury D..... 17, 173, 177
	Schwartzberg H.G..... 173
	Sebastian P. .... 15, 173
	Séchageii, iii, iv, v, vi, V, i, ii, iii, v, vi, 21, 29, 30, 32, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 51, 52, 53, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 55, 58, 79, 80, 81, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 93, 91, 102, 103, 105, 108, 109, 110, 112, 116, 117, 118, 119, 120, 123, 124, 126, 132, 133, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 145, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 155, 151, 152, 153, 154, 163, 164, 167, 170, 171, 172, 174, 177, 178, 179, 183, 184, 211, 213, 217
	Shin H.T..... 173
	Shirvill L.C..... 173
	Shusser M..... 10, 173

Silva A.C.S. Baptista da .....	173	Traitementii, iv, v, vi, i, iii, 15, 17, 24, 26,	
Sjoholm I. ....	174	29, 30, 31, 32, 43, 55, 56, 57, 74, 86,	
Splegler K.S. ....	174	91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 100, 102,	
Stawczyk J. ....	174	104, 105, 106, 107, 108, 109, 110,	
Stephan P. ....	174	111, 112, 113, 114, 117, 120, 125,	
Strub M. ....	174	126, 127, 128, 129, 130, 131, 133,	
Svaasand L.O. ....	174	135, 136, 137, 142, 143, 144, ▪ 145,	
Systèmei, iv, v, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 15,		146, 147, 148, 149, 150, 151, 152,	
17, 30, 31, 47, 55, 62, 61, 62, 69, 71,		155, 151, 154, 162, 168, 172, 174,	
72, 73, 74, 75, 76, 77, 92, 91, 92, 93,		177, 178, 179, 183, 184	
94, 95, 99, 100, 103, 106, 107, 109,		Transfertii, iv, I, i, v, 1, 6, 7, 9, 15, 18, 19,	
110, 111, 112, 113, 114, 115, 119,		27, 36, 37, 38, 39, 42, 44, 45, 46, 49,	
134, 152, 155, 156, 157, 158, 177,		50, 51, 52, 53, 56, 75, 80, 81, 82, 83,	
178, 179		84, 85, 87, 88, 89, 90, 91, 93, 124, 142,	
<b>T</b>		151, 152, 162, 171, 177, 178, 221	
Tableauvi, vii, 18, 25, 37, 48, 49, 56, 63,		Transformationi, iii, iv, 1, 3, 4, 5, 6, 7, 35,	
65, 70, 98, 107, 122, 125, 126, 127,		56, 57, 61, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 77,	
129, 133, 136, 140, 141, 143, 144,		78, 101, 102, 150, 157, 178	
145, 146, 147, 148, 152, 180, 183, 184		<b>v</b>	
Talla A. ....	174	Vachet F. ....	174
Températureiii, III, i, ii, iv, 2, 3, 4, 6, 7, 8,		VapeurI, II, III, ii, iv, 2, 7, 8, 9, 10, 12, 15,	
11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20,		29, 35, 36, 37, 38, 39, 41, 42, 44, 45,	
21, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 32,		50, 52, 53, 63, 55, 66, 74, 76, 79, 80,	
35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45,		81, 85, 87, 89, 91, 92, 93, 100, 102,	
46, 48, 50, 51, 52, 55, 57, 59, 63, 55,		103, 104, 105, 106, 111, 114, 123,	
57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 65, 66, 67,		124, 125, 127, 131, 134, 136, 150,	
68, 69, 70, 73, 74, 75, 76, 79, 83, 84,		151, 155, 152, 155, 157, 158, 159,	
88, 89, 91, 92, 93, 96, 97, 98, 99, 100,		178, 197	
101, 102, 103, 104, 105, 107, 109,		Variationi, 5, 6, 7, 11, 12, 20, 21, 23, 25,	
111, 114, 115, 116, 117, 125, 126,		26, 27, 28, 40, 43, 44, 47, 55, 61, 58,	
127, 131, 134, 135, 140, 142, 151,		61, 62, 63, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71,	
152, 155, 151, 152, 153, 177, 178,		72, 73, 74, 75, 76, 77, 85, 97, 100, 101,	
183, 221		103, 104, 107, 121, 125, 128, 130,	
Texturation.....iv, 29, 34, 102, 167, 170		134, 136, 143, 145, 147, 150, 152,	
Théoriquei, iii, iv, v, 31, 33, 55, 56, 58,		157, 158, 177, 178, 179, 183, 221	
61, 70, 71, 75, 77, 92, 102, 148, 149,		Varnalis A.I. ....	174
150, 178, 221		Videii, iv, v, 1, i, ii, 8, 17, 18, 19, 29, 30,	
Thermiqueii, 25, 46, 47, 48, 49, 86, 163,		31, 32, 35, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 75,	
183		91, 94, 95, 96, 97, 98, 103, 105, 106,	
Thermocouple17, 19, 22, 23, 94, 95, 96,		107, 109, 110, 111, 112, 113, 114,	
177, 178		131, 133, 134, 143, 144, 146, 147,	
Thermodynamiquei, iii, iv, 1, 2, 3, 4, 5, 6,		149, 151, 164, 168, 177, 178, 184	
14, 28, 31, 33, 40, 55, 56, 57, 59, 75,			
77, 91, 149, 150, 151, 152, 154, 156,			
158, 159, 162, 164, 171, 221			

***w***

Wang N. .... 175  
Watanabe T. .... 175

Wilhelm L.R. .... 175, 183  
Willix J. .... 175  
Winterbone D.E. .... 175  
Woods A. .... iii, 154, 175





# **Annexes**



## Annexe A

Annexe A : Propriétés de la vapeur d'eau entre 0 et 30 b<sup>4</sup>

P (bar)	Teb(°C)	1/ $\rho$ m <sup>3</sup> /kg	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	H <sub>liq</sub> (kj/kg)	H <sub>liq</sub> (Kcal/kg)	H (kj/kg)	H (Kcal/kg)	L (j/kg)	L (Kcal/kg)	Cp (kj/kg)	v (kg/m.s)
0,02	17,51	67,006	0,015	73,45	17,54	2533,64	605,15	2460190	587,61	1,8644	0,00001
0,03	24,1	45,667	0,022	101	24,12	2545,64	608,02	2444650	583,89	1,8694	0,00001
0,04	28,98	34,802	0,029	121,41	29	2554,51	610,13	2433100	581,14	1,8736	0,00001
0,05	32,9	28,194	0,035	137,77	32,91	2561,59	611,83	2423820	578,92	1,8774	0,00001
0,06	36,18	23,741	0,042	151,5	36,19	2567,51	613,24	2416010	577,05	1,8808	0,00001
0,07	39,02	20,531	0,049	163,38	39,02	2572,62	614,46	2409240	575,44	1,884	0,00001
0,08	41,53	18,105	0,055	173,87	41,53	2577,11	615,53	2403250	574,01	1,8871	0,00001
0,09	43,79	16,204	0,062	183,28	43,78	2581,14	616,49	2397850	572,72	1,8899	0,00001
0,1	45,83	14,675	0,068	191,84	45,82	2584,78	617,36	2392940	571,54	1,8927	0,00001
0,2	60,09	7,65	0,131	251,46	60,06	2609,86	623,35	2358400	563,3	1,9156	0,000011
0,3	69,13	5,229	0,191	289,31	69,1	2625,43	627,07	2336130	557,97	1,9343	0,000011
0,4	75,89	3,993	0,25	317,65	75,87	2636,88	629,81	2319230	553,94	1,9506	0,000011
0,5	81,35	3,24	0,309	340,57	81,34	2645,99	631,98	2305420	550,64	1,9654	0,000012
0,6	85,95	2,732	0,366	359,93	85,97	2653,57	633,79	2293640	547,83	1,979	0,000012
0,7	89,96	2,365	0,423	376,77	89,99	2660,07	635,35	2283300	545,36	1,9919	0,000012
0,8	93,51	2,087	0,479	391,73	93,56	2665,77	636,71	2274050	543,15	2,004	0,000012
0,9	96,71	1,869	0,535	405,21	96,78	2670,85	637,92	2265650	541,14	2,0156	0,000012
1	99,63	1,694	0,59	417,51	99,72	2675,43	639,02	2257920	539,3	2,0267	0,000012

<sup>4</sup> Source : Thermexcel (<http://www.thermexcel.com>)

P (bar)	Teb(°C)	1/ $\rho$ m <sup>3</sup> /kg	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	H <sub>liq</sub> (kj/kg)	H <sub>liq</sub> (Kcal/kg)	H (kj/kg)	H (Kcal/kg)	L (j/kg)	L (Kcal/kg)	Cp (kj/kg)	v (kg/m.s)
1,1	102,32	1,549	0,645	428,84	102,43	2679,61	640,01	2250760	537,59	2,0373	0,000012
1,2	104,81	1,428	0,7	439,36	104,94	2683,44	640,93	2244080	535,99	2,0476	0,000012
1,3	107,13	1,325	0,755	449,19	107,29	2686,98	641,77	2237790	534,49	2,0576	0,000013
1,4	109,32	1,236	0,809	458,42	109,49	2690,28	642,56	2231860	533,07	2,0673	0,000013
1,5	111,37	1,159	0,863	467,13	111,57	2693,36	643,3	2226230	531,73	2,0768	0,000013
1,5	111,37	1,159	0,863	467,13	111,57	2693,36	643,3	2226230	531,73	2,0768	0,000013
1,6	113,32	1,091	0,916	475,38	113,54	2696,25	643,99	2220870	530,45	2,086	0,000013
1,7	115,17	1,031	0,97	483,22	115,42	2698,97	644,64	2215750	529,22	2,095	0,000013
1,8	116,93	0,977	1,023	490,7	117,2	2701,54	645,25	2210840	528,05	2,1037	0,000013
1,9	118,62	0,929	1,076	497,85	118,91	2703,98	645,83	2206130	526,92	2,1124	0,000013
2	120,23	0,885	1,129	504,71	120,55	2706,29	646,39	2201590	525,84	2,1208	0,000013
2,2	123,27	0,81	1,235	517,63	123,63	2710,6	647,42	2192980	523,78	2,1372	0,000013
2,4	126,09	0,746	1,34	529,64	126,5	2714,55	648,36	2184910	521,86	2,1531	0,000013
2,6	128,73	0,693	1,444	540,88	129,19	2718,17	649,22	2177300	520,04	2,1685	0,000013
2,8	131,2	0,646	1,548	551,45	131,71	2721,54	650,03	2170080	518,32	2,1835	0,000013
3	133,54	0,606	1,651	561,44	134,1	2724,66	650,77	2163220	516,68	2,1981	0,000013
3,5	138,87	0,524	1,908	584,28	139,55	2731,63	652,44	2147350	512,89	2,2331	0,000014
4	143,63	0,462	2,163	604,68	144,43	2737,63	653,87	2132950	509,45	2,2664	0,000014
4,5	147,92	0,414	2,417	623,17	148,84	2742,88	655,13	2119710	506,29	2,2983	0,000014
5	151,85	0,375	2,669	640,12	152,89	2747,54	656,24	2107420	503,35	2,3289	0,000014
5,5	155,47	0,342	2,92	655,81	156,64	2751,7	657,23	2095900	500,6	2,3585	0,000014
6	158,84	0,315	3,17	670,43	160,13	2755,46	658,13	2085030	498	2,3873	0,000014
6,5	161,99	0,292	3,419	684,14	163,4	2758,87	658,94	2074730	495,54	2,4152	0,000014
7	164,96	0,273	3,667	697,07	166,49	2761,98	659,69	2064920	493,2	2,4424	0,000015
7,5	167,76	0,255	3,915	709,3	169,41	2764,84	660,37	2055530	490,96	2,469	0,000015

P (bar)	Teb(°C)	1/ $\rho$ m <sup>3</sup> /kg	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	H <sub>liq</sub> (kj/kg)	H <sub>liq</sub> (Kcal/kg)	H (kj/kg)	H (Kcal/kg)	L (j/kg)	L (Kcal/kg)	Cp (kj/kg)	v (kg/m.s)
8	170,42	0,24	4,162	720,94	172,19	2767,46	661	2046530	488,8	2,4951	0,000015
8,5	172,94	0,227	4,409	732,03	174,84	2769,89	661,58	2037860	486,73	2,5206	0,000015
9	175,36	0,215	4,655	742,64	177,38	2772,13	662,11	2029490	484,74	2,5456	0,000015
9,5	177,67	0,204	4,901	752,82	179,81	2774,22	662,61	2021400	482,8	2,5702	0,000015
10	179,88	0,194	5,147	762,6	182,14	2776,16	663,07	2013560	480,93	2,5944	0,000015
11	184,06	0,177	5,638	781,11	186,57	2779,66	663,91	1998550	477,35	2,6418	0,000015
12	187,96	0,163	6,127	798,42	190,7	2782,73	664,64	1984310	473,94	2,6878	0,000015
13	191,6	0,151	6,617	814,68	194,58	2785,42	665,29	1970730	470,7	2,7327	0,000015
14	195,04	0,141	7,106	830,05	198,26	2787,79	665,85	1957730	467,6	2,7767	0,000016
15	198,28	0,132	7,596	844,64	201,74	2789,88	666,35	1945240	464,61	2,8197	0,000016
16	201,37	0,124	8,085	858,54	205,06	2791,73	666,79	1933190	461,74	2,862	0,000016
17	204,3	0,117	8,575	871,82	208,23	2793,37	667,18	1921550	458,95	2,9036	0,000016
18	207,11	0,11	9,065	884,55	211,27	2794,81	667,53	1910270	456,26	2,9445	0,000016
19	209,79	0,105	9,556	896,78	214,19	2796,09	667,83	1899310	453,64	2,9849	0,000016
20	212,37	0,1	10,047	908,56	217,01	2797,21	668,1	1888650	451,1	3,0248	0,000016
21	214,85	0,095	10,539	919,93	219,72	2798,18	668,33	1878250	448,61	3,0643	0,000016
22	217,24	0,091	11,032	930,92	222,35	2799,03	668,54	1868110	446,19	3,1034	0,000016
23	219,55	0,087	11,525	941,57	224,89	2799,77	668,71	1858200	443,82	3,1421	0,000016
24	221,78	0,083	12,02	951,9	227,36	2800,39	668,86	1848490	441,5	3,1805	0,000017
25	223,94	0,08	12,515	961,93	229,75	2800,91	668,99	1838980	439,23	3,2187	0,000017
26	226,03	0,077	13,012	971,69	232,08	2801,35	669,09	1829660	437,01	3,2567	0,000017
27	228,06	0,074	13,509	981,19	234,35	2801,69	669,17	1820500	434,82	3,2944	0,000017
28	230,04	0,071	14,008	990,46	236,57	2801,96	669,24	1811500	432,67	3,332	0,000017
29	231,96	0,069	14,508	999,5	238,73	2802,15	669,28	1802650	430,56	3,3695	0,000017
30	233,84	0,067	15,009	1008,33	240,84	2802,27	669,31	1793940	428,48	3,4069	0,000017



## Annexe B

Annexe B : Propriétés de l'eau entre 0 et 200 °C<sup>5</sup>

P(bar)	T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1/ $\rho$ (m <sup>3</sup> /kg)	U (kJ/kg)	H (kJ/kg)	S (J/g*K)	Cv (J/kg*K)	Cp (J/g*K)	Sound Spd. (m/s)
0,006117	0,01	999,79	0,0010002	5,48E-07	0,0006123	1,203E-09	4217,4	4,2199	1402,3
0,006576	1,01	999,85	0,0010001	4,218	4,2187	0,015413	4215,2	4,2166	1407,3
0,007065	2,0099	999,89	0,0010001	8,4328	8,4335	0,030759	4212,9	4,2135	1412,1
0,007586	3,0099	999,92	0,0010001	12,645	12,645	0,046038	4210,4	4,2106	1416,9
0,008141	4,0098	999,93	0,0010001	16,854	16,854	0,061252	4207,9	4,2079	1421,5
0,008732	5,0098	999,92	0,0010001	21,06	21,061	0,076401	4205,3	4,2054	1426,1
0,00936	6,0097	999,89	0,0010001	25,264	25,265	0,091488	4202,6	4,2032	1430,5
0,010028	7,0097	999,86	0,0010001	29,466	29,467	0,10651	4199,8	4,201	1434,8
0,010737	8,0096	999,8	0,0010002	33,666	33,667	0,12148	4196,9	4,199	1439
0,01149	9,0096	999,73	0,0010003	37,864	37,865	0,13638	4194	4,1972	1443,1
0,01229	10,01	999,65	0,0010003	42,06	42,061	0,15123	4191	4,1955	1447,1
0,013138	11,01	999,56	0,0010004	46,254	46,256	0,16601	4187,9	4,194	1451,1
0,014037	12,009	999,45	0,0010005	50,447	50,449	0,18074	4184,7	4,1925	1454,9
0,01499	13,009	999,33	0,0010007	54,639	54,641	0,19542	4181,4	4,1912	1458,6
0,015999	14,009	999,2	0,0010008	58,829	58,831	0,21003	4178,1	4,1899	1462,3
0,017068	15,009	999,05	0,0010009	63,018	63,02	0,2246	4174,8	4,1888	1465,8
0,018199	16,009	998,9	0,0010011	67,207	67,208	0,23911	4171,3	4,1877	1469,3
0,019395	17,009	998,73	0,0010013	71,394	71,395	0,25356	4167,8	4,1868	1472,6
0,020659	18,009	998,55	0,0010015	75,58	75,582	0,26796	4164,3	4,1859	1475,9

<sup>5</sup> Source Thermexcel (<http://www.thermexcel.com>)



P(bar)	T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1/ $\rho$ (m <sup>3</sup> /kg)	U (kJ/kg)	H (kJ/kg)	S (J/g*K)	Cv (J/kg*K)	Cp (J/g*K)	Sound Spd. (m/s)
0,021995	19,009	998,36	0,0010016	79,765	79,767	0,28231	4160,7	4,1851	1479,1
0,023406	20,009	998,16	0,0010018	83,949	83,952	0,29661	4157	4,1844	1482,2
0,024896	21,009	997,95	0,0010021	88,133	88,136	0,31086	4153,3	4,1837	1485,2
0,026468	22,009	997,73	0,0010023	92,316	92,319	0,32506	4149,5	4,1831	1488,2
0,028126	23,009	997,49	0,0010025	96,499	96,502	0,3392	4145,7	4,1825	1491,1
0,029874	24,009	997,25	0,0010028	100,68	100,68	0,3533	4141,8	4,182	1493,8
0,031716	25,009	997	0,001003	104,86	104,87	0,36735	4137,9	4,1816	1496,6
0,033656	26,009	996,74	0,0010033	109,04	109,05	0,38135	4133,9	4,1812	1499,2
0,035699	27,009	996,47	0,0010035	113,22	113,23	0,3953	4129,9	4,1809	1501,8
0,037849	28,009	996,19	0,0010038	117,41	117,41	0,4092	4125,8	4,1806	1504,2
0,040112	29,009	995,9	0,0010041	121,59	121,59	0,42306	4121,7	4,1803	1506,7
0,04249	30,009	995,6	0,0010044	125,77	125,77	0,43687	4117,5	4,1801	1509
0,044991	31,009	995,3	0,0010047	129,94	129,95	0,45064	4113,3	4,1799	1511,3
0,047618	32,008	994,98	0,001005	134,12	134,13	0,46436	4109	4,1798	1513,5
0,050378	33,008	994,66	0,0010054	138,3	138,31	0,47803	4104,8	4,1796	1515,6
0,053275	34,008	994,33	0,0010057	142,48	142,49	0,49166	4100,4	4,1796	1517,7
0,056316	35,008	993,99	0,001006	146,66	146,67	0,50524	4096	4,1795	1519,7
0,059506	36,008	993,64	0,0010064	150,84	150,85	0,51878	4091,6	4,1795	1521,6
0,062851	37,008	993,28	0,0010068	155,02	155,03	0,53228	4087,2	4,1795	1523,5
0,066357	38,008	992,92	0,0010071	159,2	159,21	0,54573	4082,7	4,1795	1525,3
0,070032	39,008	992,55	0,0010075	163,38	163,39	0,55914	4078,2	4,1796	1527,1
0,073881	40,008	992,17	0,0010079	167,56	167,57	0,57251	4073,6	4,1796	1528,8
0,077911	41,008	991,79	0,0010083	171,74	171,75	0,58583	4069	4,1797	1530,4
0,08213	42,008	991,39	0,0010087	175,92	175,93	0,59912	4064,4	4,1799	1531,9
0,086544	43,008	990,99	0,0010091	180,1	180,11	0,61236	4059,8	4,18	1533,5
0,091161	44,008	990,58	0,0010095	184,28	184,29	0,62556	4055,1	4,1802	1534,9

P(bar)	T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1/ $\rho$ (m <sup>3</sup> /kg)	U (kJ/kg)	H (kJ/kg)	S (J/g*K)	Cv (J/kg*K)	Cp (J/g*K)	Sound Spd. (m/s)
0,095988	45,008	990,17	0,0010099	188,46	188,47	0,63872	4050,4	4,1804	1536,3
0,10103	46,008	989,75	0,0010104	192,64	192,65	0,65183	4045,6	4,1806	1537,6
0,10631	47,008	989,32	0,0010108	196,82	196,83	0,66491	4040,9	4,1808	1538,9
0,11181	48,008	988,88	0,0010112	201	201,01	0,67795	4036,1	4,181	1540,1
0,11756	49,008	988,44	0,0010117	205,18	205,19	0,69095	4031,2	4,1813	1541,3
0,12357	50,008	987,99	0,0010122	209,36	209,37	0,70391	4026,4	4,1815	1542,4
0,12983	51,008	987,54	0,0010126	213,54	213,56	0,71682	4021,5	4,1818	1543,5
0,13636	52,007	987,08	0,0010131	217,72	217,74	0,7297	4016,6	4,1821	1544,5
0,14317	53,007	986,61	0,0010136	221,91	221,92	0,74255	4011,7	4,1825	1545,5
0,15028	54,007	986,13	0,0010141	226,09	226,1	0,75535	4006,7	4,1828	1546,4
0,15768	55,007	985,65	0,0010146	230,27	230,29	0,76812	4001,8	4,1832	1547,2
0,16539	56,007	985,17	0,0010151	234,45	234,47	0,78084	3996,8	4,1835	1548,1
0,17341	57,007	984,67	0,0010156	238,64	238,65	0,79353	3991,8	4,1839	1548,8
0,18177	58,007	984,17	0,0010161	242,82	242,84	0,80619	3986,7	4,1843	1549,5
0,19048	59,007	983,67	0,0010166	247	247,02	0,8188	3981,7	4,1847	1550,2
0,19953	60,007	983,16	0,0010171	251,19	251,21	0,83138	3976,6	4,1851	1550,8
0,20895	61,007	982,64	0,0010177	255,37	255,4	0,84392	3971,5	4,1856	1551,4
0,21874	62,007	982,12	0,0010182	259,56	259,58	0,85643	3966,4	4,186	1551,9
0,22892	63,007	981,59	0,0010188	263,75	263,77	0,8689	3961,3	4,1865	1552,4
0,2395	64,007	981,05	0,0010193	267,93	267,96	0,88134	3956,2	4,187	1552,9
0,25049	65,007	980,51	0,0010199	272,12	272,14	0,89374	3951,1	4,1875	1553,3
0,26191	66,007	979,97	0,0010204	276,31	276,33	0,9061	3945,9	4,188	1553,6
0,27376	67,007	979,42	0,001021	280,49	280,52	0,91843	3940,8	4,1885	1553,9
0,28607	68,007	978,86	0,0010216	284,68	284,71	0,93072	3935,6	4,1891	1554,2
0,29885	69,007	978,3	0,0010222	288,87	288,9	0,94299	3930,4	4,1896	1554,4
0,3121	70,007	977,73	0,0010228	293,06	293,09	0,95521	3925,2	4,1902	1554,6

P(bar)	T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1/ $\rho$ (m <sup>3</sup> /kg)	U (kJ/kg)	H (kJ/kg)	S (J/g*K)	Cv (J/kg*K)	Cp (J/g*K)	Sound Spd. (m/s)
0,32584	71,007	977,16	0,0010234	297,25	297,28	0,9674	3920	4,1908	1554,8
0,3401	72,006	976,58	0,001024	301,44	301,48	0,97956	3914,8	4,1914	1554,9
0,35487	73,006	975,99	0,0010246	305,63	305,67	0,99169	3909,6	4,192	1554,9
0,37019	74,006	975,41	0,0010252	309,82	309,86	1,0038	3904,4	4,1927	1555
0,38605	75,006	974,81	0,0010258	314,02	314,06	1,0158	3899,1	4,1933	1554,9
0,40249	76,006	974,21	0,0010265	318,21	318,25	1,0279	3893,9	4,194	1554,9
0,41951	77,006	973,61	0,0010271	322,4	322,45	1,0399	3888,7	4,1947	1554,8
0,43714	78,006	973	0,0010278	326,6	326,64	1,0518	3883,4	4,1954	1554,7
0,45538	79,006	972,38	0,0010284	330,79	330,84	1,0638	3878,2	4,1961	1554,5
0,47426	80,006	971,76	0,0010291	334,99	335,04	1,0756	3872,9	4,1969	1554,3
0,49379	81,006	971,14	0,0010297	339,19	339,24	1,0875	3867,7	4,1976	1554,1
0,51399	82,006	970,51	0,0010304	343,38	343,44	1,0994	3862,4	4,1984	1553,8
0,53488	83,006	969,87	0,0010311	347,58	347,64	1,1112	3857,1	4,1992	1553,5
0,55648	84,006	969,23	0,0010317	351,78	351,84	1,1229	3851,9	4,2	1553,2
0,5788	85,006	968,59	0,0010324	355,98	356,04	1,1347	3846,6	4,2008	1552,8
0,60187	86,006	967,94	0,0010331	360,18	360,24	1,1464	3841,4	4,2017	1552,4
0,6257	87,006	967,28	0,0010338	364,38	364,45	1,1581	3836,1	4,2026	1551,9
0,65031	88,006	966,62	0,0010345	368,58	368,65	1,1697	3830,9	4,2034	1551,4
0,67572	89,006	965,96	0,0010352	372,79	372,86	1,1813	3825,6	4,2044	1550,9
0,70196	90,006	965,29	0,001036	376,99	377,06	1,1929	3820,4	4,2053	1550,4
0,72905	91,006	964,62	0,0010367	381,19	381,27	1,2045	3815,1	4,2062	1549,8
0,757	92,005	963,94	0,0010374	385,4	385,48	1,216	3809,9	4,2072	1549,2
0,78583	93,005	963,26	0,0010381	389,61	389,69	1,2275	3804,6	4,2082	1548,5
0,81557	94,005	962,57	0,0010389	393,81	393,9	1,239	3799,4	4,2092	1547,9
0,84625	95,005	961,88	0,0010396	398,02	398,11	1,2505	3794,2	4,2102	1547,2
0,87787	96,005	961,18	0,0010404	402,23	402,32	1,2619	3789	4,2113	1546,4

P(bar)	T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1/ $\rho$ (m <sup>3</sup> /kg)	U (kJ/kg)	H (kJ/kg)	S (J/g*K)	Cv (J/kg*K)	Cp (J/g*K)	Sound Spd. (m/s)
0,91047	97,005	960,48	0,0010411	406,44	406,54	1,2733	3783,7	4,2123	1545,7
0,94407	98,005	959,77	0,0010419	410,65	410,75	1,2846	3778,5	4,2134	1544,8
0,97869	99,005	959,06	0,0010427	414,87	414,97	1,296	3773,3	4,2145	1544
1,0144	100,01	958,35	0,0010435	419,08	419,19	1,3073	3768,1	4,2157	1543,2
1,0511	101,01	957,63	0,0010442	423,3	423,41	1,3185	3762,9	4,2168	1542,3
1,0889	102	956,9	0,001045	427,51	427,63	1,3298	3757,8	4,218	1541,3
1,1279	103	956,17	0,0010458	431,73	431,85	1,341	3752,6	4,2192	1540,4
1,168	104	955,44	0,0010466	435,95	436,07	1,3522	3747,4	4,2205	1539,4
1,2092	105	954,7	0,0010474	440,17	440,29	1,3634	3742,3	4,2217	1538,4
1,2517	106	953,96	0,0010483	444,39	444,52	1,3745	3737,1	4,223	1537,4
1,2954	107	953,21	0,0010491	448,61	448,75	1,3857	3732	4,2243	1536,3
1,3403	108	952,46	0,0010499	452,83	452,97	1,3968	3726,9	4,2256	1535,2
1,3865	109	951,7	0,0010507	457,06	457,2	1,4078	3721,7	4,227	1534,1
1,434	110	950,94	0,0010516	461,28	461,43	1,4189	3716,6	4,2283	1532,9
1,4828	111	950,18	0,0010524	465,51	465,67	1,4299	3711,5	4,2297	1531,7
1,533	112	949,41	0,0010533	469,74	469,9	1,4409	3706,4	4,2312	1530,5
1,5846	113	948,64	0,0010541	473,97	474,14	1,4519	3701,4	4,2326	1529,3
1,6376	114	947,86	0,001055	478,2	478,37	1,4628	3696,3	4,2341	1528
1,6921	115	947,08	0,0010559	482,43	482,61	1,4737	3691,3	4,2356	1526,7
1,748	116	946,29	0,0010568	486,67	486,85	1,4846	3686,2	4,2371	1525,4
1,8054	117	945,5	0,0010576	490,9	491,09	1,4955	3681,2	4,2387	1524,1
1,8644	118	944,71	0,0010585	495,14	495,34	1,5063	3676,2	4,2403	1522,7
1,9249	119	943,91	0,0010594	499,38	499,58	1,5172	3671,2	4,2419	1521,3
1,987	120	943,1	0,0010603	503,62	503,83	1,528	3666,2	4,2435	1519,9
2,0507	121	942,3	0,0010612	507,86	508,08	1,5387	3661,2	4,2452	1518,4
2,1161	122	941,48	0,0010622	512,1	512,33	1,5495	3656,2	4,2469	1517

P(bar)	T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1/ $\rho$ (m <sup>3</sup> /kg)	U (kJ/kg)	H (kJ/kg)	S (J/g*K)	Cv (J/kg*K)	Cp (J/g*K)	Sound Spd. (m/s)
2,1832	123	940,67	0,0010631	516,35	516,58	1,5602	3651,3	4,2486	1515,5
2,2521	124	939,85	0,001064	520,59	520,83	1,5709	3646,3	4,2504	1513,9
2,3227	125	939,02	0,0010649	524,84	525,09	1,5816	3641,4	4,2521	1512,4
2,395	126	938,19	0,0010659	529,09	529,35	1,5923	3636,5	4,254	1510,8
2,4692	127	937,36	0,0010668	533,34	533,61	1,6029	3631,6	4,2558	1509,2
2,5453	128	936,52	0,0010678	537,6	537,87	1,6135	3626,7	4,2577	1507,6
2,6232	129	935,68	0,0010687	541,85	542,13	1,6241	3621,9	4,2596	1505,9
2,7031	130	934,83	0,0010697	546,11	546,4	1,6347	3617	4,2615	1504,3
2,7849	131	933,98	0,0010707	550,37	550,67	1,6452	3612,2	4,2635	1502,6
2,8687	132	933,13	0,0010717	554,63	554,94	1,6558	3607,4	4,2655	1500,9
2,9546	133	932,27	0,0010727	558,89	559,21	1,6663	3602,6	4,2675	1499,1
3,0425	134	931,4	0,0010736	563,16	563,48	1,6768	3597,8	4,2695	1497,3
3,1326	135	930,53	0,0010747	567,42	567,76	1,6872	3593	4,2716	1495,5
3,2248	136	929,66	0,0010757	571,69	572,04	1,6977	3588,2	4,2738	1493,7
3,3191	137	928,79	0,0010767	575,96	576,32	1,7081	3583,5	4,2759	1491,9
3,4157	138	927,91	0,0010777	580,23	580,6	1,7185	3578,8	4,2781	1490
3,5146	139	927,02	0,0010787	584,51	584,89	1,7289	3574	4,2803	1488,1
3,6157	140	926,13	0,0010798	588,78	589,17	1,7393	3569,3	4,2826	1486,2
3,7192	141	925,24	0,0010808	593,06	593,46	1,7496	3564,7	4,2849	1484,3
3,825	142	924,34	0,0010819	597,34	597,76	1,7599	3560	4,2872	1482,3
3,9333	143	923,44	0,0010829	601,63	602,05	1,7702	3555,3	4,2896	1480,3
4,044	144	922,53	0,001084	605,91	606,35	1,7805	3550,7	4,292	1478,3
4,1572	145	921,62	0,001085	610,2	610,65	1,7908	3546,1	4,2944	1476,3
4,2729	146	920,71	0,0010861	614,49	614,95	1,801	3541,5	4,2969	1474,3
4,3912	147	919,79	0,0010872	618,78	619,26	1,8113	3536,9	4,2994	1472,2
4,5121	148	918,86	0,0010883	623,08	623,57	1,8215	3532,3	4,3019	1470,1

P(bar)	T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1/ $\rho$ (m <sup>3</sup> /kg)	U (kJ/kg)	H (kJ/kg)	S (J/g*K)	Cv (J/kg*K)	Cp (J/g*K)	Sound Spd. (m/s)
4,6357	149	917,94	0,0010894	627,37	627,88	1,8317	3527,8	4,3045	1468
4,762	150	917,01	0,0010905	631,67	632,19	1,8418	3523,2	4,3071	1465,8
4,891	151	916,07	0,0010916	635,97	636,51	1,852	3518,7	4,3097	1463,7
5,0228	152	915,13	0,0010927	640,28	640,83	1,8621	3514,2	4,3124	1461,5
5,1574	153	914,18	0,0010939	644,58	645,15	1,8722	3509,7	4,3152	1459,3
5,2949	154	913,23	0,001095	648,89	649,47	1,8823	3505,2	4,3179	1457,1
5,4353	155	912,28	0,0010962	653,2	653,8	1,8924	3500,8	4,3207	1454,8
5,5787	156	911,32	0,0010973	657,52	658,13	1,9025	3496,3	4,3236	1452,5
5,7251	157	910,36	0,0010985	661,83	662,46	1,9125	3491,9	4,3265	1450,2
5,8745	158	909,39	0,0010996	666,15	666,8	1,9226	3487,5	4,3294	1447,9
6,027	159	908,42	0,0011008	670,48	671,14	1,9326	3483,1	4,3324	1445,6
6,1827	160	907,45	0,001102	674,8	675,48	1,9426	3478,8	4,3354	1443,2
6,3415	161	906,47	0,0011032	679,13	679,83	1,9526	3474,4	4,3384	1440,9
6,5036	162	905,48	0,0011044	683,46	684,18	1,9625	3470,1	4,3415	1438,5
6,6689	163	904,49	0,0011056	687,79	688,53	1,9725	3465,8	4,3446	1436
6,8376	164	903,5	0,0011068	692,13	692,89	1,9824	3461,5	4,3478	1433,6
7,0096	165	902,5	0,001108	696,47	697,24	1,9923	3457,2	4,351	1431,1
7,1851	166	901,5	0,0011093	700,81	701,61	2,0022	3452,9	4,3543	1428,7
7,3641	167	900,5	0,0011105	705,15	705,97	2,0121	3448,6	4,3576	1426,2
7,5465	168	899,48	0,0011117	709,5	710,34	2,022	3444,4	4,361	1423,6
7,7325	169	898,47	0,001113	713,85	714,71	2,0318	3440,2	4,3644	1421,1
7,9222	170	897,45	0,0011143	718,21	719,09	2,0417	3436	4,3678	1418,5
8,1155	171	896,42	0,0011155	722,56	723,47	2,0515	3431,8	4,3713	1415,9
8,3125	172	895,4	0,0011168	726,93	727,85	2,0613	3427,6	4,3749	1413,3
8,5132	173	894,36	0,0011181	731,29	732,24	2,0711	3423,5	4,3785	1410,7
8,7178	174	893,32	0,0011194	735,66	736,63	2,0809	3419,4	4,3821	1408

P(bar)	T (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1/ $\rho$ (m <sup>3</sup> /kg)	U (kJ/kg)	H (kJ/kg)	S (J/g*K)	Cv (J/kg*K)	Cp (J/g*K)	Sound Spd. (m/s)
8,9263	175	892,28	0,0011207	740,03	741,03	2,0906	3415,2	4,3858	1405,4
9,1387	176	891,23	0,001122	744,4	745,42	2,1004	3411,1	4,3895	1402,7
9,355	177	890,18	0,0011234	748,78	749,83	2,1101	3407,1	4,3933	1400
9,7998	179	888,06	0,001126	757,54	758,64	2,1296	3399	4,401	1394,5
10,028	180	887	0,0011274	761,93	763,06	2,1393	3394,9	4,405	1391,7
10,261	181	885,93	0,0011288	766,32	767,48	2,1489	3390,9	4,409	1388,9
10,498	182	884,85	0,0011301	770,71	771,9	2,1586	3386,9	4,413	1386,1
10,739	183	883,77	0,0011315	775,11	776,33	2,1683	3382,9	4,4171	1383,3
10,985	184	882,69	0,0011329	779,51	780,76	2,1779	3379	4,4213	1380,4
11,235	185	881,6	0,0011343	783,92	785,19	2,1875	3375	4,4255	1377,5
11,489	186	880,5	0,0011357	788,33	789,63	2,1971	3371,1	4,4298	1374,6
11,748	187	879,4	0,0011371	792,74	794,08	2,2068	3367,2	4,4341	1371,7
12,012	188	878,3	0,0011386	797,16	798,52	2,2163	3363,3	4,4385	1368,8
12,28	189	877,19	0,00114	801,58	802,98	2,2259	3359,4	4,4429	1365,8
12,553	190	876,08	0,0011415	806	807,43	2,2355	3355,6	4,4474	1362,9
12,83	191	874,96	0,0011429	810,43	811,9	2,245	3351,7	4,452	1359,9
13,112	192	873,83	0,0011444	814,86	816,36	2,2546	3347,9	4,4566	1356,9
13,399	193	872,7	0,0011459	819,3	820,83	2,2641	3344,1	4,4613	1353,8
13,691	194	871,57	0,0011474	823,74	825,31	2,2736	3340,3	4,466	1350,8
13,988	195	870,43	0,0011489	828,18	829,79	2,2832	3336,5	4,4708	1347,7
14,29	196	869,29	0,0011504	832,63	834,28	2,2927	3332,8	4,4757	1344,6
14,597	197	868,14	0,0011519	837,09	838,77	2,3021	3329	4,4806	1341,5
14,909	198	866,98	0,0011534	841,54	843,26	2,3116	3325,3	4,4856	1338,4
15,227	199	865,82	0,001155	846,01	847,77	2,3211	3321,6	4,4907	1335,2
15,549	200	864,66	0,0011565	850,47	852,27	2,3305	3317,9	4,4958	1332,1

## Annexe C

*Annexe C : Propriétés thermodynamiques du R-134a<sup>6</sup> de 102,03 g/mol de masse molaire*

P (bar)	T(K)	$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_g$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$h_f$ (kJ/kg)	$h_g$ (kJ/kg)	$S_f$ (kJ/kg.K)	$S_g$ (kJ/kg.K)	$c_{pif}$ (kJ/kg.K)	$\mu_f$ (10 <sup>-6</sup> Pa.s)	$\lambda_f$ (W/m.K)
0,0039	169,85	1591,1	2,8	-76,68	186,5	-0,383	1,1665	1,147	2187	
0,5	232,69	1416,0	2,7	-0,57	225,27	-0,0025	0,9669	1,242	506	0,1121
0,6	236,22	1405,9	3,3	3,85	227,52	0,0161	0,9636	1,248	480	0,1105
0,8	242,04	1389,1	4,2	11,15	231,19	0,0467	0,956	1,258	438	0,1078
1	246,8	1375,1	5,2	17,14	234,15	0,0713	0,9507	1,267	408	0,1056
1,013	247,03	1374,4	5,3	17,5	234,33	0,0728	0,9503	1,268	406	0,1054
1,5	256,03	1347,5	7,6	28,96	239,86	0,1181	0,9419	1,288	358,7	0,1013
2	263,09	1325,7	10,0	38,13	244,14	0,1533	0,9364	1,306	326,6	0,098
2,5	268,88	1307,5	12,4	45,75	247,6	0,1819	0,9326	1,322	303,2	0,0954
3	273,82	1291,5	14,8	52,33	250,5	0,2059	0,9297	1,337	285,1	0,0931
4	282,08	1263,9	19,5	63,5	255,22	0,2458	0,9256	1,363	257,7	0,0893
5	288,89	1240,2	24,3	72,87	258,99	0,2784	0,9232	1,387	237,5	0,0861
6	294,72	1219,1	29,1	81,04	262,09	0,3062	0,9208	1,41	221,6	0,0835
8	304,47	1182,0	39,0	95	267,01	0,3522	0,9171	1,454	197,6	0,079
10	312,53	1149,0	49,1	106,86	270,74	0,3901	0,9144	1,497	179,5	0,0753
12	319,47	1118,8	59,7	117,34	273,65	0,4227	0,912	1,541	165,1	0,0721
14	325,57	1090,5	70,7	126,8	275,92	0,4515	0,9095	1,589	153	0,0693
16	330,11	1068,1	80,2	134	277,4	0,4729	0,9073	1,631	144,3	0,0672
18	336,04	1046,6	94,4	143,68	279,01	0,5013	0,9041	1,698	133,2	0,0645
20	340,63	1010,7	107,4	151,39	279,95	0,5236	0,901	1,764	124,8	0,0623
25	350,73	944,7	143,9	169,3	280,64	0,5738	0,8913	1,987	106,6	0,0577

<sup>6</sup> Source : Perry's Chemical Engineers' Handbook (7th Edition)



P (bar)	T(K)	$\rho_l$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_g$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$h_f$ (kJ/kg)	$h_g$ (kJ/kg)	$S_f$ (kJ/kg.K)	$S_g$ (kJ/kg.K)	$c_{pf}$ (kJ/kg.K)	$\mu_f$ (10 <sup>-6</sup> Pa.s)	$\lambda_f$ (W/m.K)
30	359,37	874,1	189,4	185,05	278,32	0,6212	0,8807	2,418	90,4	0,0538
35	366,89	787,4	250,6	203,19	273,52	0,6657	0,8574			
40	373,5	622,7	392,2	229,24	257,12	0,7292	0,8038			
40,56	374,18	513,3	512,8	241,22	241,22	0,762	0,762			

## Annexe D

Annexe D : Résultats de séchage de différents produits par DDS

Courgette					$\omega$ (kg.s <sup>-1</sup> )			$\Omega$ (kg.cycle <sup>-1</sup> )		
DDS-ATM	P <sub>h</sub> (b)	P <sub>b</sub> (b)	t <sub>h</sub> (s)	t <sub>b</sub> (s)	RM	DIC 1	DIC 2	RM	DIC 1	DIC 2
1	4	1	20	5	3,3E06	1,2E05	1,2E05	8,2E05	2,9E04	3,1E04
2	4	1	20	5	5,3E06	2,2E05	6,9E06	1,3E04	5,4E04	1,7E04
3	4	1	20	5	3,1E06	1,3E05	1,2E05	7,7E05	3,2E04	2,9E04
4	6	1	20	5	5,1E06	1,0E05	1,2E05	1,3E04	2,5E04	3,1E04
5	2,6	1	9	5	4,4E06	2,4E05	1,1E05	6,2E05	3,4E04	1,6E04
6	4	1	36	5	2,4E06	9,1E06	1,4E05	9,7E05	3,7E04	5,6E04
7	5,4	1	9	5	6,6E06	1,7E05	8,1E06	9,3E05	2,3E04	1,1E04
8	4	1	20	5	3,1E06	1,3E05	1,3E05	7,8E05	3,1E04	3,2E04
9	2	1	20	5	2,6E06	8,3E06	7,9E06	6,4E05	2,1E04	2,0E04
10	5,4	1	31	5	2,5E06	8,1E06	1,1E05	9,2E05	2,9E04	3,9E04
11	2,6	1	31	5	2,4E06	6,1E06	1,1E05	8,5E05	2,2E04	4,1E04

Patate Douce					$\omega$ (kg.s <sup>-1</sup> )			$\Omega$ (kg.cycle <sup>-1</sup> )		
DDSATM	P <sub>h</sub> (b)	P <sub>b</sub> (b)	t <sub>h</sub> (s)	t <sub>b</sub> (s)	RM	DIC 1	DIC 2	RM	DIC 1	DIC 2
1	4	1	20	5	1,2E06	7,8E06	6,0E06	3,1E05	3,9E05	5,4E11
2	6	1	20	5	5,6E06	2,7E05	2,4E05	1,4E04	1,3E04	7,8E10
3	2,6	1	9	5	1,3E06	3,1E06	5,8E06	1,9E05	1,6E05	2,6E11
4	5,4	1	9	5	1,9E06	6,2E06	5,3E06	2,6E05	3,1E05	4,3E11

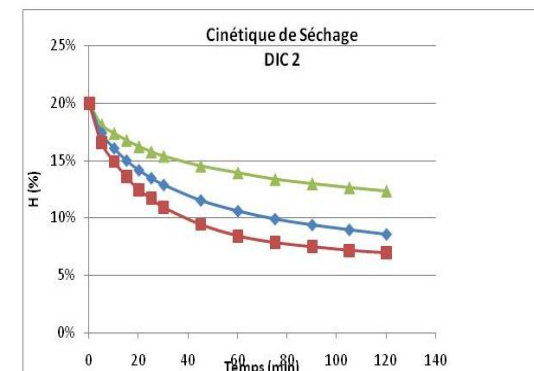
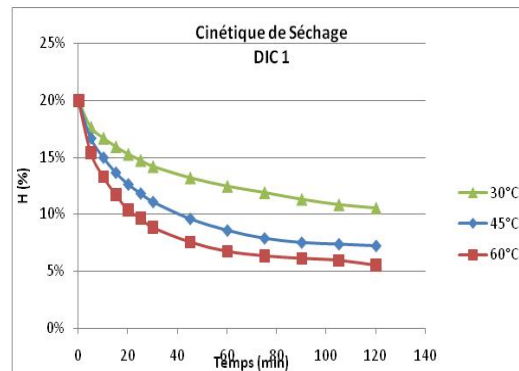
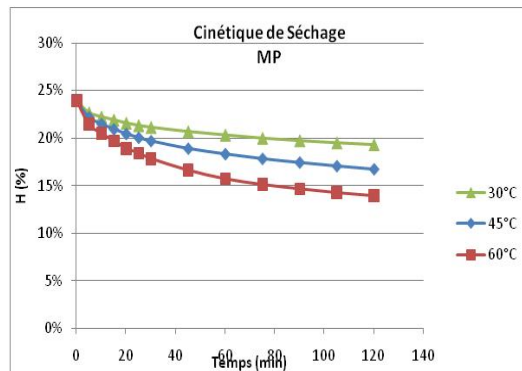
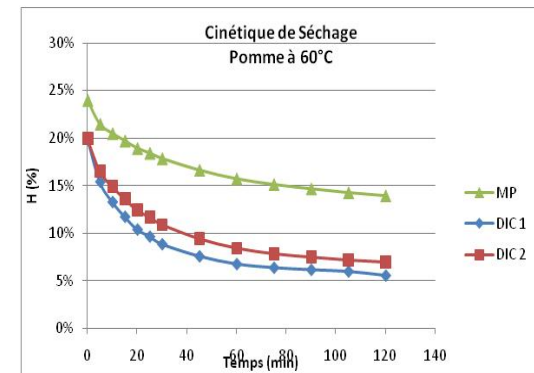
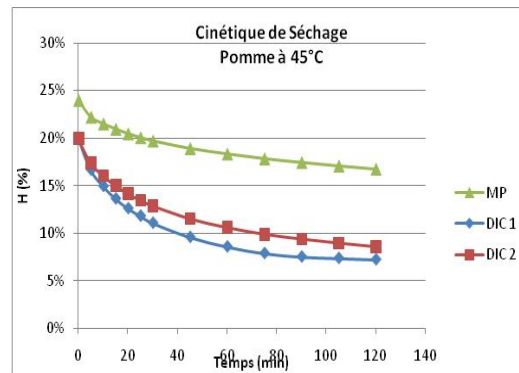
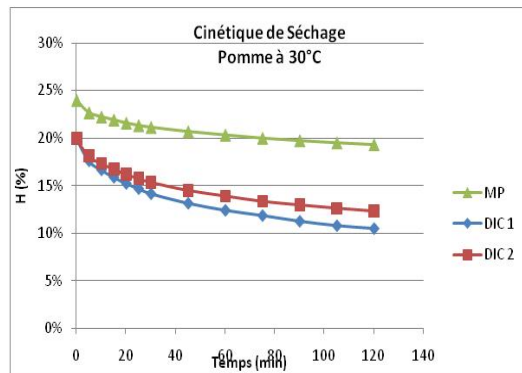
6	2	1	20	5	2,1E06	1,4E05	1,4E05	5,4E05	6,8E05	2,2E10
---	---	---	----	---	--------	--------	--------	--------	--------	--------

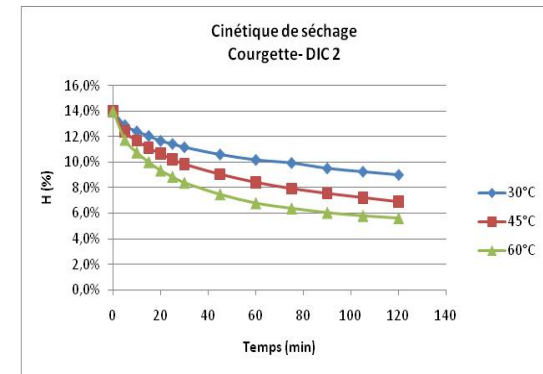
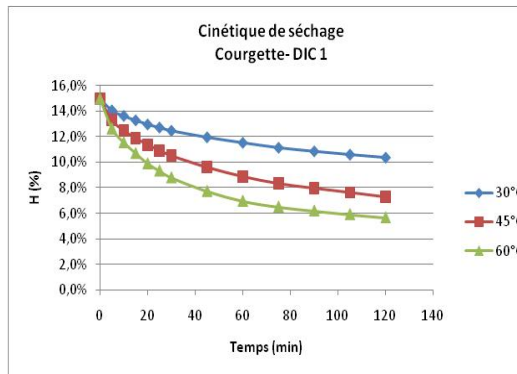
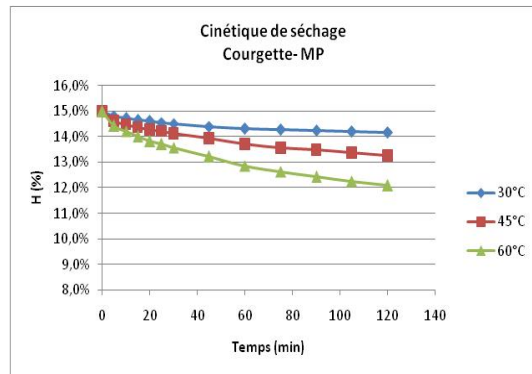
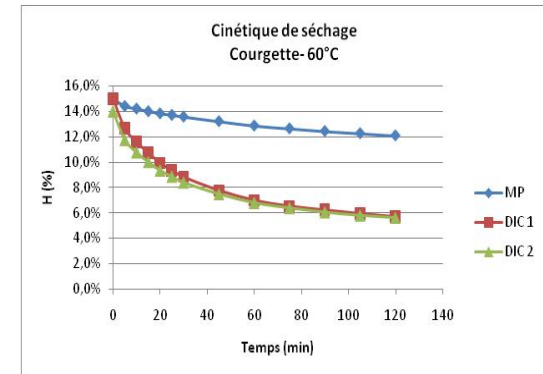
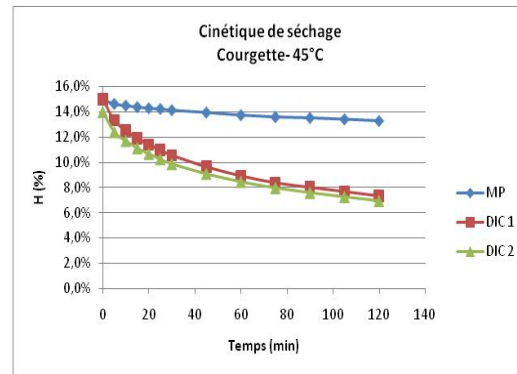
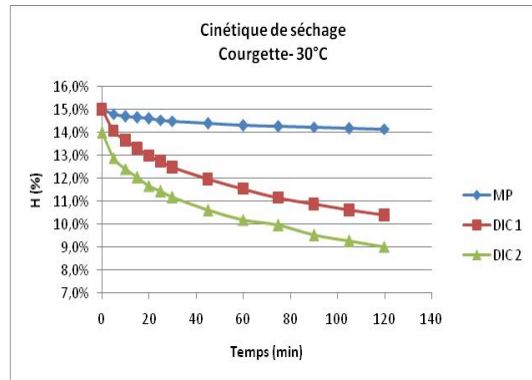
OIGNON					$\omega$ (kg.s <sup>1</sup> )			$\Omega$ (kg.cycle <sup>1</sup> )		
DDSATM	P <sub>h</sub> (b)	P <sub>b</sub> (b)	t <sub>h</sub> (s)	t <sub>b</sub> (s)	RM	DIC 1	DIC 2	RM	DIC 1	DIC 2
1	4	1	20	5	3,4E06	2,9E05	1,1E05	8,6E05	7,2E04	2,8E04
2	6	1	20	5	1,7E05	6,7E05	4,0E05	4,2E04	1,7E03	1,0E03
3	2,6	1	9	5	4,1E06	8,7E06	1,7E05	5,7E05	1,2E04	2,4E04
4	5,4	1	9	5	6,1E06	3,2E05	1,6E05	8,5E05	4,5E04	2,3E04
6	2	1	20	5	3,1E06	1,0E05	6,6E06	7,7E05	2,5E04	1,7E04
7	6	1	20	5	2,5E06	8,3E06	4,4E06	6,3E05	2,1E04	1,1E04
8	6	1	4	5	1,4E05	3,5E05	1,2E05	1,2E04	3,1E04	1,1E04

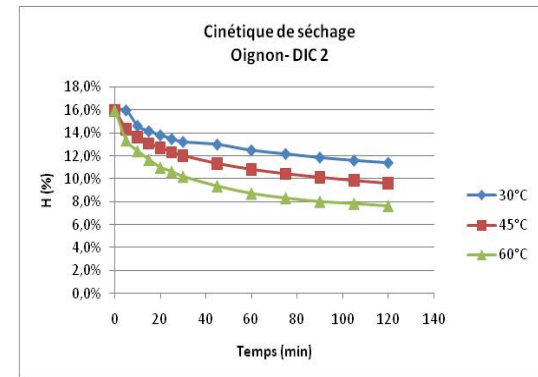
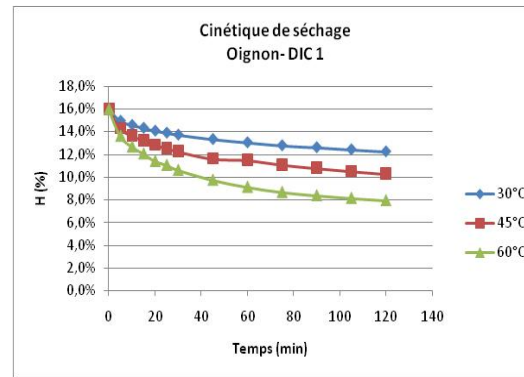
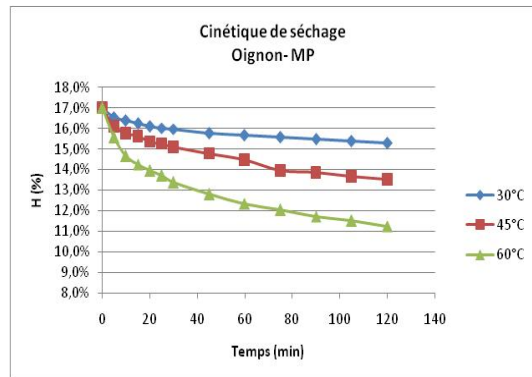
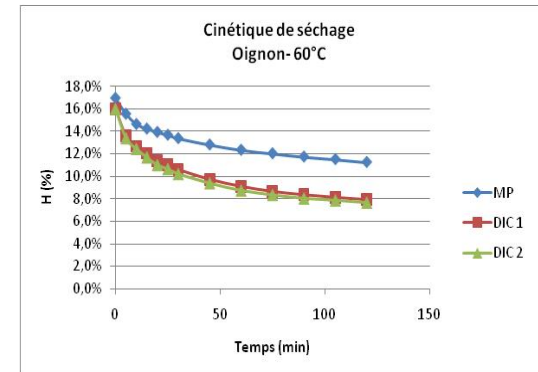
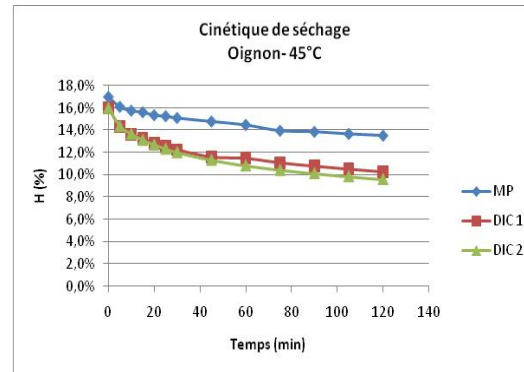
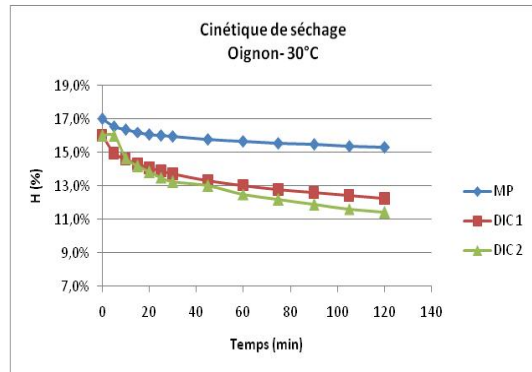
OIGNON					$\omega$ (kg.s <sup>1</sup> )			$\Omega$ (kg.cycle <sup>1</sup> )		
DDSVAC	P <sub>h</sub> (b)	P <sub>b</sub> (b)	t <sub>h</sub> (s)	t <sub>b</sub> (s)	RM	DIC 1	DIC 2	RM	DIC 1	DIC 2
1	2	0,05	11	11	1,1E05	1,3E05	1,2E05	2,33E04	2,81E04	2,61E04
2	5	0,05	11	11	1,6E05	3,2E05	2,4E05	3,48E04	7,07E04	5,17E04
3	2	0,05	29	11	2,2E05	2,7E05	3,2E05	8,71E04	1,06E03	1,27E03
4	5	0,05	29	11	4,3E05	6,5E05	2,7E05	1,71E03	2,59E03	1,08E03
5	2	0,05	29	29	4,8E06	1,1E05	1,1E05	2,80E04	6,40E04	6,31E04
6	5	0,05	11	29	1,1E05	2,1E05	1,8E05	4,45E04	8,29E04	7,12E04

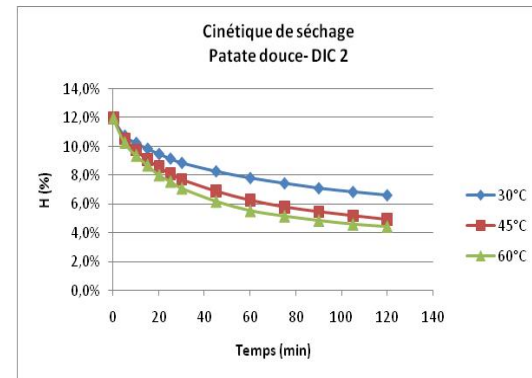
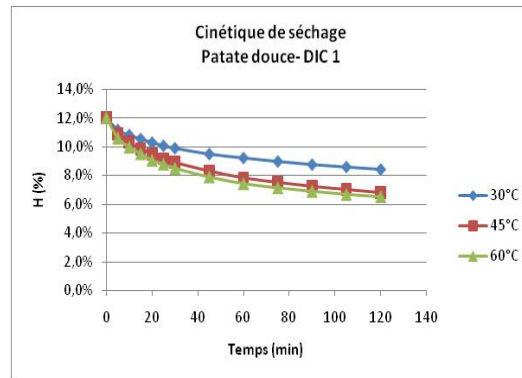
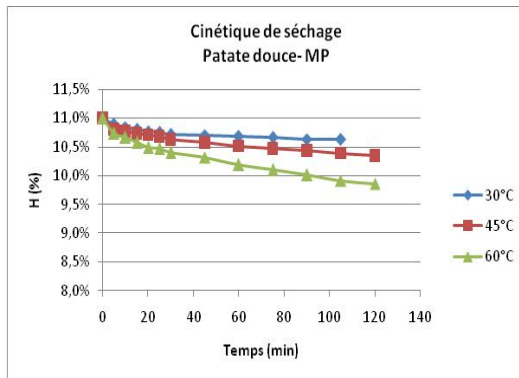
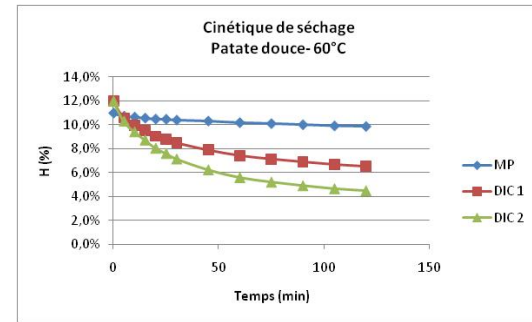
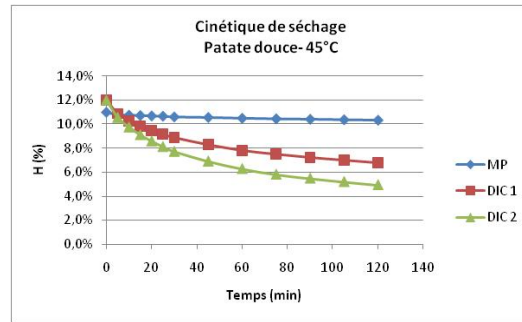
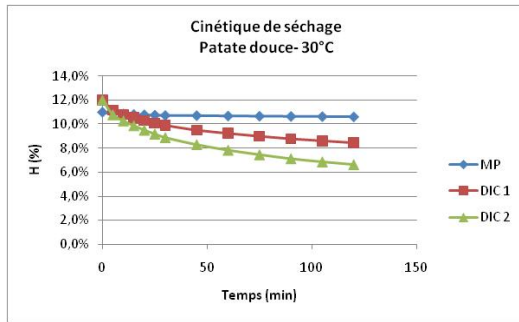
# Annexe E

## Annexe E : Graphiques de cinétiques de séchage des différents produits



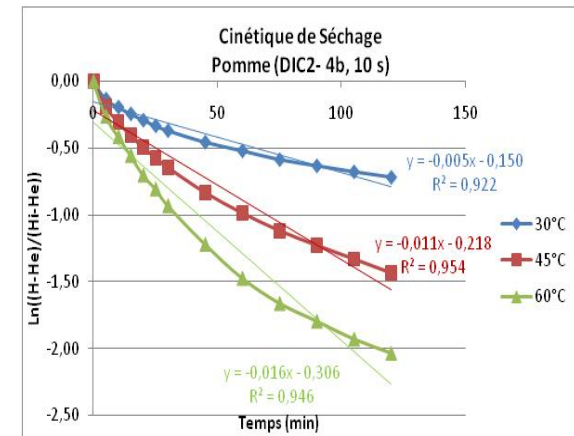
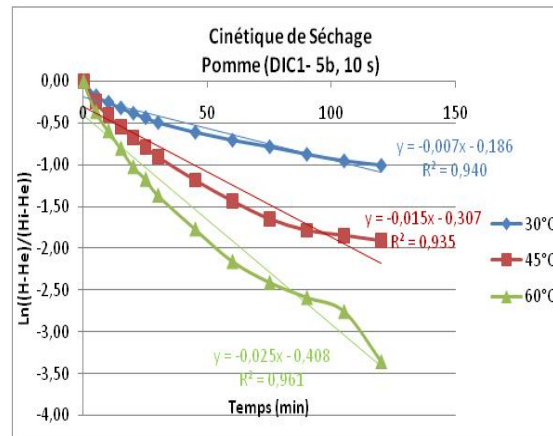
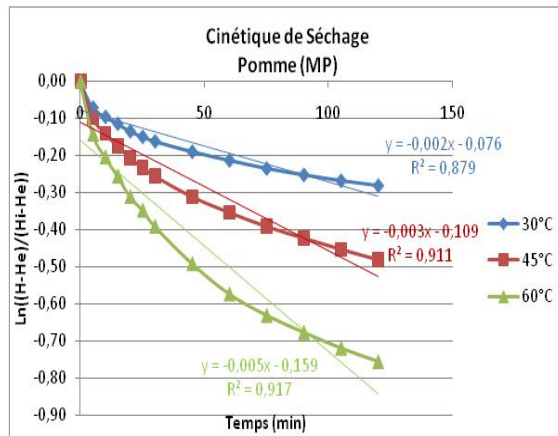




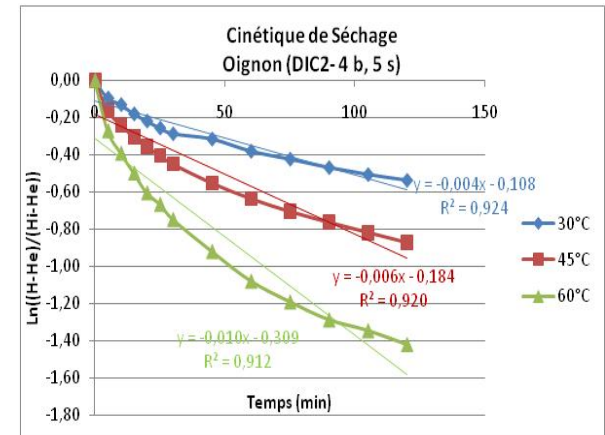
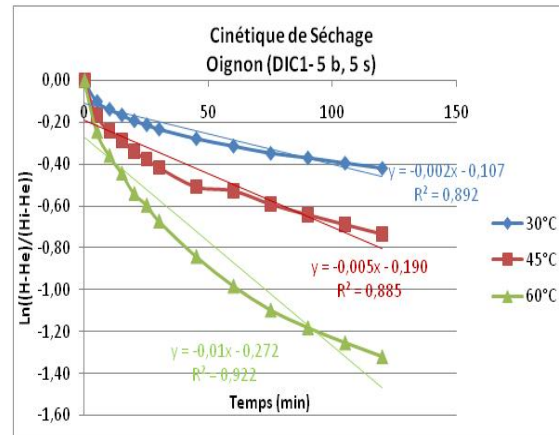
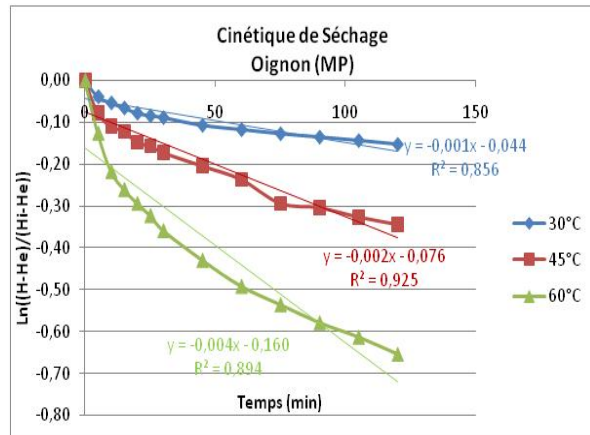
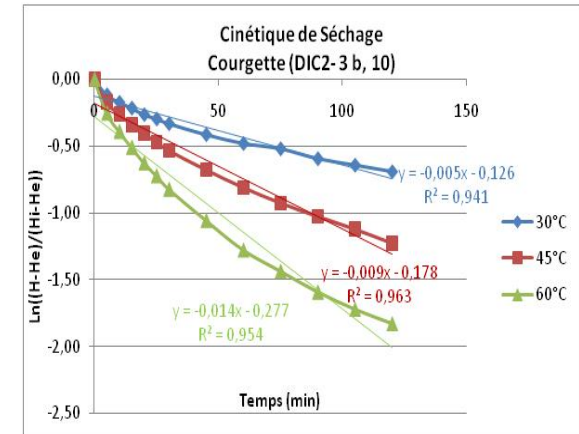
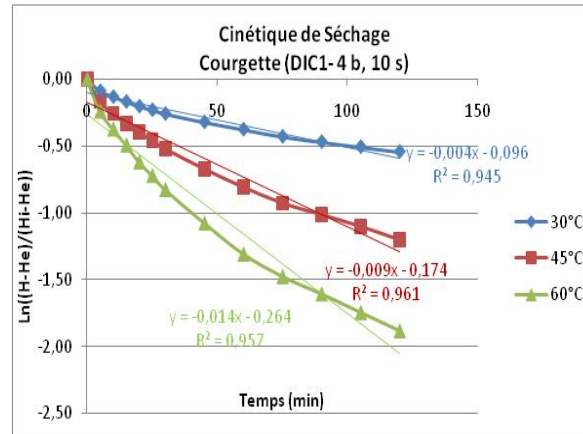
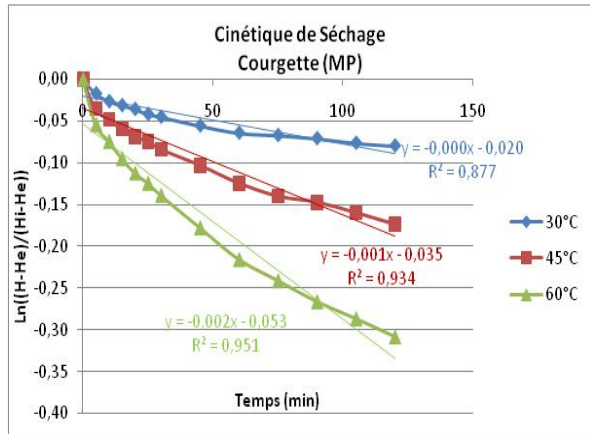


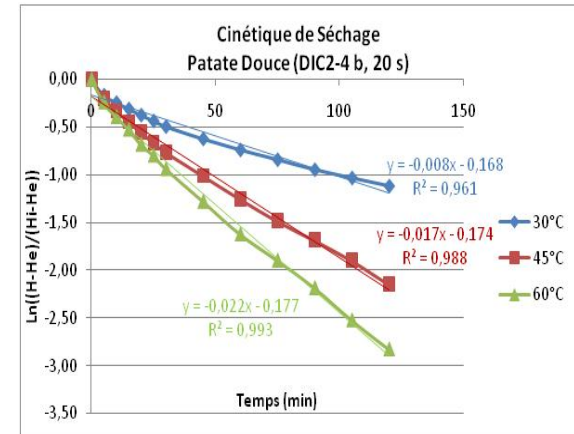
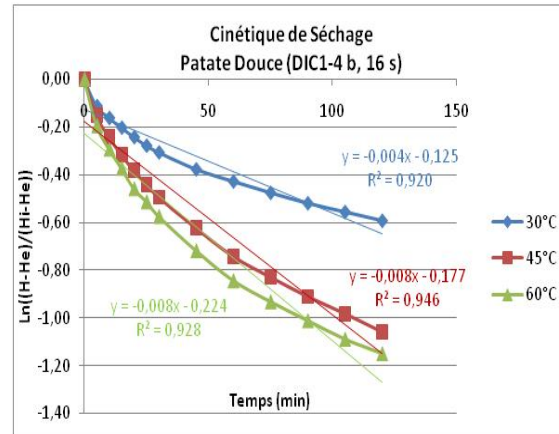
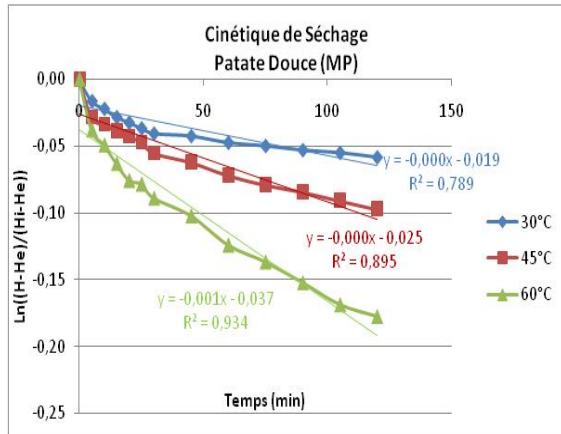
## Annexe F

### Annexe F : Résultats des cinétiques de séchage par Air Chaud











---

**RESUME:**

L'autovaporisation instantanée, en tant que processus fondamental, est corrélée à une variation abrupte des conditions thermodynamiques du milieu environnant en deçà de la saturation du liquide. Pendant l'autovaporisation, aucun transfert de chaleur entre le matériau et le milieu extérieur n'a alors lieu vu la courte durée du processus ; la quantité de chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau est récupérée uniquement au sein même de la matière qui voit sa température baisser d'une façon significative.

De nombreuses opérations et expérimentations réalisées telles que le BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion), le LOCA (Loss Of Coolant Accident), le WFEC (Water Flash Evaporation Cooling), le CSC (Cryogen Spray Cooling), la DIC (Détente Instantanée Contrôlée),... impliquent l'autovaporisation.

Aucune étude « générale » n'a été établie. Pourtant, le dépassement de l'état d'équilibre quasi-statique, température et quantité (ou débit) d'eau vaporisée prévues, remet en question le deuxième principe au plan de l'étape intermédiaire... Le deuxième principe reste applicable dès que l'équilibre est atteint.

En effet, malgré les nombreuses applications aucune étude thermodynamique classique n'a pu expliquer les phénomènes observés ; seule l'analyse théorique spécifique aux phénomènes d'instantanéité proposée par ALLAF en 2002, sera à la base de l'explication et l'étude de ce type d'autovaporisation.

Nous allons à travers cette étude, expliquer et prouver la pertinence de cette analyse théorique dans le cas de quelques phénomènes thermodynamiques « instantanés ».

**SUMMARY:**

The instantaneous autovaporisation, as a fundamental process, is correlated to an abrupt variation of the thermodynamic conditions of the surrounding environment below the conditions of saturation of the liquid. During the autovaporisation, no heat transfer between the material and the surrounding environment takes place because of the shortness of the process then; the quantity of heat necessary to the evaporation of water is recovered only within the matter that sees its temperature lowering in a meaningful way.

Numerous operations and experimentations realized like BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion), LOCA (Loss Of Coolant Accident), WFEC (Water Flash Evaporation Cooling), CSC (Cryogen Spray Cooling), DIC (Instantaneous Controlled Pressure Drop)... imply the autovaporisation process.

No general survey has been established yet. Nevertheless, the passing of the quasi-static balance states, temperature and quantity (or flux) of evaporated water predicted, reconsiders the second principle of thermodynamics on the plan of the intermediate stage... The second principle remains applicable as soon as the balance is reached.

In spite of the numerous applications, no classical thermodynamic survey could explain the phenomena observed. Indeed, only the specific theoretical analysis to the instantaneous phenomena proposed by ALLAF in 2002 will be the basis of the explanation and the survey of this type of autovaporisation. Through this survey, we will explain and prove the relevance of this theoretical analysis in the case of some instantaneous phenomena.

---