

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mentouri de Constantine
Institut de la Nutrition de l'Alimentation et des Technologies
Agro-Alimentaires
(I.N.A.T.A.A)

N° de série:
N° d'ordre:

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Sciences Alimentaires
Option : Biochimie et Technologie Alimentaire

THEME

ETUDE DU COMPORTEMENT AU SECHAGE DE
SIX LEGUMES : CAROTTE, COURGETTE,
CARDON, POMME DE TERRE, AIL ET OIGNON

Présenté par : MEDJOU DJ Hacène

Devant le jury :

Président :	M. AGLI A.N.	Professeur (U. M. C.)
Rapporteur :	M. ZIDOUNE M.N.	Professeur (U. M. C.)
Examineurs :	M. NAMOUNE H.	Professeur (U. M. C.)
	M. BENTCHIKOU M.M.	Professeur (U. M. C.)
	Mme BARKAT M.	M.C. (U. M. C.)
	M. KABOUCHE A.	M. C. (U. M. C.)

REMERCIEMENTS

Mes vifs remerciements vont aux membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail :

Monsieur le professeur ZIDOUNE M.N pour avoir dirigé ce travail avec une efficacité et rigueur scientifiques qui lui sont propres. Pour sa disponibilité et la patience qu'il a eu à notre égard.

Monsieur le professeur AGLI A. pour avoir accepté de présider ce jury, par ses conseils éclairés il ne fera qu'enrichir cette étude.

Monsieur le professeur NAMOUNE H. pour avoir accepté de faire partie du jury, par ses conseils et remarques il contribuera à améliorer la qualité de ce travail.

Monsieur le professeur BENCHIKOU M. pour sa participation à l'évaluation de ce travail, ses remarques ne feront que l'enrichir.

Madame BARKAT M. pour sa participation à l'évaluation de ce travail, ses remarques ne feront qu'apporter un plus à ce travail.

Monsieur KABOUCHE A. pour sa participation à l'évaluation de ce travail, son intervention ne fera qu'apporter de la clarté à ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude :

A Monsieur SELLOUH Dj. notre Directeur du secteur sanitaire de MI LA pour sa compréhension et sa patience et l'ensemble de la direction qui nous ont facilité l'achèvement de ce travail

Au personnel du laboratoire d'hygiène de MI LA et l'ensemble des collègues pour m'avoir supporté et encouragé durant la durée de préparation de ce travail

Au personnel enseignant de l'I.N.A.T.A.A. pour les conseils qui m'ont été donnés.

Au personnel Technique et Administratif de l'I.N.A.T.A.A. pour leur accueil et contribution qui ont facilité la réalisation de ce travail.

A toutes les personnes qui ont contribuées à la réalisation de ce travail; les collègues de promotion du Magister pour leur soutien,

Sans oublier les Ingénieurs M^{elles} Benachour A. et Bouarroudj N. pour leur participation à cette étude.

A Monsieur FATHALLAH R. (de Teleghma) et Monsieur AI OUAZ S. (Mila)
de la direction de l'agriculteur pour leur aide qui nous a été précieuse.

DEDICACES

Je dédie ce travail

A la mémoire de mon cher père qui n'a jamais connu mes succès
(que Dieu ait son âme)

A ma mère, symbole de patience avec mon filiale attachement,
que Dieu la garde

A mon épouse TOURIYA, avec tout mon dévouement, qu'elle
trouve ici tout mon attachement pour son aide, sa patience et
soutien indéfectible.

A mes fils ABDELMADJID, ABDERRAHMANE et ABDERRAOUF
(MOUNIR), avec toute mon affection de père, que ce travail leur
serve d'exemple de courage, que Dieu les protège.

A mon unique sœur, avec toute mon affection,

A mes grands parents dont la vie fut consacrée à mon éducation,
je les assure de mon éternelle reconnaissance.

A tout ceux qui sont proches qu'ils trouvent ici le témoignage de
ma gratitude.

A mes amis qui n'ont cessé de me soutenir et m'encourager,
ABDELGHANI et MOHAMED à qui je souhaite la réussite.

A toutes les personnes qui ont participé et soutenu la
réalisation de ce travail

PLAN DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

I - ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION.....	1
A- Rappels : Eau et évolution des légumes après récolte	
1-L'eau dans le tissu végétal	4
2-Classification des fruits et légumes	5
3-Evolution après récolte	5
3-1-Physiologie des produits frais après récolte	5
3-2-Détériorations physiologiques.....	5
3-2-1- Respiration	6
3-2-2- Transpiration ou perte d'eau	6
4-Intérêt et effet du froid	6
5-Consommation des légumes	7
6- Principaux débouchés industriels des légumes	8
B- légumes destinés au séchage	
1/Carotte	9
1-1-Origine et présentation générale.....	9
1-1-1-Origine et évolution	9
1-1-2-Situation économique	10
1-2-Morphologie et développement de la plante	10
1-2-1-Evolution de la composition biochimique	11
1-3- La plante	11
1-3-1-Phases de développement	11
1-3-2-Morphologie de la racine au moment de la récolte	12

1-3-3-Classification	12
1-4-Facteurs de l'environnement	13
1-5-Récolte et conservation.....	13
1-6-Composition	14
2-Courgette	15
2-1-Origine et présentation générale	15
2-1-1-Origine et évolution	15
2-1-2- Situation économique	16
2-2-Morphologie et développement de la plante	16
2-2-1-Phases de développement	16
2-2-2-Morphologie au moment de la récolte	17
2-2-3-Classification.....	17
2-3-la plante	17
2-4-Facteurs de l'environnement	17
2-5-Récolte, conservation, conditionnement	19
2-6-Composition et Evolution de la composition biochimique.....	20
3- Carde (cardon).....	21
3-1-Origine et présentation générale.....	21
3-1-1- Physionomie de la production.....	21
3-1-2-Situation économique.....	22
3-2-La plante	22
3-2-1-Caractères botaniques	22
3-2-2-Variétés	22
3-3-Facteurs d'environnement	23
3-4-Production	23
3-5-Récolte, conservation, conditionnement	23
3-5-1-blanchiment	23
3-5-2-Récolte.....	24
3-6-Composition du cardon cru	24
4-Pomme de terre	24

4-1- Origine et présentation générale	24
4-1-1-Physionomie de la production	24
4-1-2-Situation économique	25
4-2- La plante	25
4-3-Facteurs de l'environnement	26
4-4-Classification.....	27
4-5-Récolte, conservation, conditionnement	27
4-6-Composition chimique de la pomme de terre.....	29
5-Ail	29
5-1- Origine et présentation générale	30
5-1-1-Physionomie de la production	30
5-1-2-Situation économique	30
5-2- La plante	31
5-2-1-Caractères botaniques	31
5-2-2-Classification.....	31
5-3-Facteurs de l'environnement.....	31
5-4-La production	33
5-5-Récolte, conservation, conditionnement, utilisation	33
5-6-Composition chimique de l'ail.....	34
6/ Oignon	34
6-1- Origine et présentation générale	35
6-1-1-Origine.....	35
6-1-2-Situation économique.....	35
6-2- La plante.:.....	36
6-3-Facteurs de l'environnement.....	37
6-4-Production.:	38
6-5-Récolte, conservation, conditionnement.....	38
6-6-Composition chimique de l'Oignon.....	39
C-Le séchage	40

1-Définitions	40
2-Mécanismes d'élimination d'eau	40
3-Modes de séchage.....	41
3-1-Mode d'apport de la chaleur	42
3-2-Séchage par entraînement	42
4-Procédés de séchage	43
4-1-Pression de vapeur de l'eau du produit	43
4-2- l'élimination d'eau	43
4-2-1-Activité de l'eau	44
4-2-2-Mesure de l'activité de l'eau	46
5- Différentes étapes du séchage d'un produit humide	47
5-1-Blanchiment	47
5-1-1-Principe et objectif.....	47
5-1-2-Problèmes liés au blanchiment	48
5-1-3-Modes et méthodes de blanchiment	49
5-2- Conditions de séchage.....	49
5-3- Cinétique et Obtention des courbes de séchage et interprétation	49
5-4-Différentes périodes (phases) du séchage d'un produit humide.....	51
5-4-1-Phase (ou période) de mise en température	51
5-4-2-Phase (ou période) à vitesse (allure) de séchage constante.....	52
5-4-3-Phase (ou période) à allure (ou vitesse) de séchage décroissante	53
5-5-Mécanismes intervenants au cours du séchage.....	54
5-5-1- Transferts de chaleur	54
5-5-2-Transferts de chaleur et de matière.....	56
5-5-3-Transferts d'eau en séchage.....	56
5-5-4- Elimination d'eau par entraînement.....	57
5-5-4-1- Modes de transfert de matière	57
5-5-4-1- Mouvement de l'eau à l'intérieur des corps à sécher.....	58
6-Choix du mode de séchage	58
7- Séchage et qualité	59
8-Réhydratation	59
8-1-Diversité de contexte et d'objectifs.....	59

8-2-Réhydratation de particules solides.....	60
9- Séchage solaire	61

II - PARTIE EXPERIMENTALE

A - Matériel et méthodes

1- Matière végétale.....	63
1-1- La carotte.....	63
1-2- La courgette	63
1-3- Le cardon	63
1-4- La pomme de terre.....	66
1-5- L'ail	66
1-6- L'oignon	66
2- Matériel technique.....	66
2-1-Matériel de découpe	66
2-2-Matériel pour blanchiment	66
2-3-Matériel pour l'étude du séchage	67
2-3-1-Sécheur armoire à air chaud	67
2-3-2-Sécheur solaire.....	68
3- Méthodes	70
3-1- Humidité et activité de l'eau	70
3-1-1-Détermination de l'humidité des légumes.....	70
3-1-2- Température et humidité relative de l'air (HR).....	71
3-1-3- Détermination de l'activité de l'eau (aw) des légumes	73
3-2-Traitement des matières premières avant séchage	74
3-2-1-Tri	74
3-2-2-Nettoyage	77
3-2-3-Blanchiment	77
3-2-4-Mode de découpe	78
3-3-Etude des cinétiques au cours du séchage par air chaud (armoire).....	83
3-3-1-Constitution et répartition des lots.....	83
3-3-2- Obtention des tracés de cinétiques de vitesse de séchage.....	85

3-3-3- Appréciation de la qualité des légumes au cours du séchage	86
3-3-3-1- Evolution de la forme et des dimensions	86
3-3-3-2- Evolution de la couleur	87
3-3-4- Appréciation de l'aptitude à la réhydratation des légumes séchés.....	87
3-4- Séchage solaire	88
B - Résultats et discussion	
1-Richesse en eau des légumes à déshydrater.....	90
2-Séchage et comportement de la carotte	92
2-1- Résultats expérimentaux et expression en vitesse de séchage	92
2-2- Cinétique de séchage.....	95
2-2-1-Présentation de l'allure générale de la courbe de cinétique	95
2-2-2-Effet de la température sur la cinétique et la vitesse de séchage.....	97
2-2-3-Effet de la dimension sur la cinétique et la vitesse de séchage.....	107
2-2-4- Discussion et conclusion (distinction des phases).....	112
2-2-5-Activité de l'eau (aw) du légume séché.....	116
2-3-Effet du séchage sur la qualité de la carotte	118
2-3-1-Rétrécissement et déformation au cours du séchage.....	118
2-3-2-Changement de la couleur au cours du séchage.....	125
2-4- Aptitude à la réhydratation de la carotte séchée.....	128
2-4-1- Effet de la température de séchage.....	132
2-4-2- Effet de la taille de découpe.....	135
3-Séchage et comportement de la courgette	139
3-1- Cinétique de séchage.....	139
3-1-1-Effet de la température sur la cinétique et la vitesse de séchage.....	139
3-1-2-Effet de la dimension sur la cinétique et la vitesse de séchage.....	147
3-1-3- Discussion et conclusion (distinction des phases).....	152
3-1-4-Activité de l'eau de la courgette séché.....	153
3-2-Evolution de la qualité du légume au cours du séchage.....	154
3-2-1-Rétrécissement et déformation.....	154
3-2-2-Changement de la couleur	159
3-3- Aptitude à la réhydratation de la courgette séchée.....	163
3-3-1- Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation.....	167

3-3-2- Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation	169
4 -Séchage et comportement du cardon	173
4-1- Cinétique de séchage.....	173
4-1-1- Effet de la température sur la cinétique et la vitesse de séchage.....	173
4-1-2- Effet de la dimension sur la cinétique et la vitesse de séchage.....	181
4-1-3- Discussion et conclusion (distinction des phases).....	186
4-1-4- Activité de l'eau du cardon séché.....	188
4-2-Evolution de la qualité du légume au cours du séchage.....	189
4-2-1-Rétrécissement et déformation	189
4-2-2-Changement de la couleur.....	191
4-3- Aptitude à la réhydratation du cardon séché.....	193
4-3-1-Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation	194
4-3-2-Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation.....	198
5-Séchage et comportement de la pomme de terre.....	203
5-1- Cinétique de séchage.....	203
5-1-1-Effet de la température sur la cinétique et la vitesse de séchage.....	203
5-1-2-Effet de la dimension sur la cinétique et la vitesse de séchage.....	211
5-1-3- Discussion et conclusion (distinction des phases.....	217
5-1-4- Activité de l'eau (aw) du légume séché.....	219
5-2-Evolution de la qualité du légume au cours du séchage.....	222
5-2-1-Rétrécissement et déformation	222
5-2-2-Changement de la couleur.....	226
5-3- Aptitude à la réhydratation de la pomme de terre séchée.....	230
5-3-1- Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation.....	230
5-3-2- Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation.....	235
5-4- Séchage solaire.....	239
5-4-1-Performances du séchoir.....	239
5-4-2-Cinétique et vitesse de séchage.....	240
5-4-3-Conclusion et discussion.....	243
6-Séchage et comportement de l'ail.....	245

6-1- Cinétique de séchage.....	245
6-1-1-Effet de la température sur la cinétique et la vitesse de séchage.....	245
6-1-2-Effet de la dimension sur la cinétique et la vitesse de séchage.....	250
6-1-3- Discussion et conclusion (distinction des phases).....	255
6-1-4-Activité de l'eau (aw) de l'ail à l'état frais et séché.....	256
6-2-Evolution de la qualité du légume au cours du séchage.....	260
6-2-1-Rétrécissement et déformation	260
6-2-2-Changement de la couleur	260
6-3- Aptitude à la réhydratation de l'ail séché.....	262
6-3-1- Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation.....	264
6-3-2- Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation.....	266
6-4-Séchage solaire.....	269
6-4-1- Performances du séchoir.....	269
6-4-2- Cinétique et vitesse de séchage.....	270
6-4-3- Evolution de la qualité de l'ail au séchage solaire.....	273
6-4-4- Conclusion et discussion.....	274
7-Séchage et comportement de l'oignon.....	275
7-1- Cinétique de séchage.....	275
7-1-1- Effet de la température sur la cinétique et la vitesse de séchage.....	275
7-1-2-Effet de la dimension sur la cinétique et la vitesse de séchage.....	281
7-1-3- Discussion et conclusion (distinction des phases).....	286
7-1-4- Activité de l'eau (aw) de l'oignon à l'état frais et séché.....	287
7-2-Evolution de la qualité du légume au cours du séchage.....	291
7-2-1-Rétrécissement et déformation	291
7-2-2-Changement de la couleur	294
7-3-Aptitude à la réhydratation de l'oignon séché.....	296
7-3-1- Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation.....	296
7-3-2- Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation.....	299
7-4-Séchage solaire.....	302
7-4-1-Performances du séchoir.....	302
7-4-2-Cinétique et vitesse de séchage.....	303
7-4-3-Conclusion et discussion.....	306

C/ Discussion des résultats et synthèse	307
D/ Conclusion générale.....	313
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	316
ANNEXE	

Liste des tableaux

Partie bibliographique

Présentation des légumes

Tableau 1: Conditions de conservation au froid recommandées pour quelques légumes p 7
Tableau 2: Production mondiale de la carotte de l'année 2003 p 10
Tableau 3: Composition chimique de la carotte crue et séchée p 15
Tableau 4: Composition chimique de la courgette (zucchini) crue p21
Tableau 5: Composition chimique du cardon p 24
Tableau 6: Principaux producteurs mondiaux de la pomme de terre en 2003 p25
Tableau 7: Composition chimique de la pomme de terre épluchée crue p29
Tableau 8: Production mondiale de l'ail en 2003 p30
Tableau 9: Composition chimique de l'ail frais p34
Tableau 10: Principaux producteurs mondiaux de l'oignon sec en 2003 p35
Tableau 11: Composition chimique de l'oignon cru et séché p39

Partie expérimentale

Tableau 1 : Caractéristiques générales des 6 légumes étudiés p65
Tableau 2 : Température et humidité relative (HR) moyennes au cours du séchage des différents légumes p72
Tableau 3 : Dimensions moyennes avec écarts types des légumes étudiés p 76
Tableau 4 : Barème de blanchiment appliqué aux quatre légumes p 78
Tableau 5 : Variation des dimensions en cm des morceaux constituant les lots des six produits préparées aux trois température de séchage p 79
Tableau 6 : Variation des épaisseurs de découpe (en mm) des six légumes avec écarts type et coefficients de variation. P 81
Tableau 7 : Répartition des lots permettant le suivi du séchage selon les légumes p 84

Tableau 8 a : Moyennes d'humidités initiales des six légumes en g/100 g de matière humide et en g/g de masse sèche: p 90

Tableau 8 b : Variation de la mesure de la teneur en eau avant et après blanchiment de la courgette, cardon et pomme de terre p92

Tableau 9 : Résultats expérimentaux de la cinétique de séchage de la carotte à 60°C, épaisseur 5,8±0,1 mm p 93

Tableau 10 : Résultats du découpage de la courbe lissée : cas de la carotte à 60°C (épaisseur 5,8 mm) p 93

Tableau 11: Valeurs des variations de temps, de teneur en eau résiduelle et de vitesse de séchage des rondelles de carotte par épaisseur et par température (Annexe 2).

Tableau 12 : Moyenne de la masse initiale et de la variation de masse des 3 essais p 116

Tableau 13 : Taux de rétrécissement des rondelles de carotte séchées à 60°C, épaisseur initiale 5,75 mm p119

Tableau 14 a : Rétraction axiale des rondelles de carotte séchées p 121

Tableau 14 b : Rétraction diamétrale des rondelles de carotte séchées. P 122

Tableau 15 : Taux de Réhydratation (TR) de la carotte (à 26±2°C) en fonction de la température de séchage et de la taille de découpe p 132.

Tableau 16 : Valeurs des variations de temps, de teneur en eau résiduelle et de vitesse de séchage des rondelles de courgette par épaisseur et par température (Annexe 2)

Tableau 17 : Moyenne de la masse initiale et de la variation de masse des 3 essais p 153

Tableau 18 a : Rétrécissement axial (épaisseur) des rondelles de courgette séchées p_157

Tableau 18 b : Rétrécissement diamétral (diamètre) des rondelles de courgette séchées p 157

Tableau 18 : Valeurs des taux de réhydratation atteint par les rondelles de courgette au bout de 6 heures à 29±2°C p 166

Tableau 19 : Valeurs des variations de temps, de teneur en eau résiduelle et de vitesse de séchage des tranches de cardon par épaisseur et par température (Annexe 2)

Tableau 20 : Moyenne de la masse initiale et de la variation de masse des 3 essais p 188

Tableau 21 : Taux de Réhydratation (TR) du cardon (à $26\pm 2^{\circ}\text{C}$) en fonction de la température de séchage et de la taille de découpe. p 195

Tableau 22 : Valeurs des variations de temps, de teneur en eau résiduelle et de vitesse de séchage des rondelles de pomme de terre par épaisseur et par température (Annexe2)

Tableau 23 a : Moyenne de la masse initiale et de la variation de masse des 3 essais (fraîche) p 219

Tableau 23 b : Moyenne de la masse initiale et de la variation de masse des 3 essais (sèche): p 219

Tableau 24 a : Rétrécissement axial de rondelles de pomme de terre séchées. P 223

Tableau 24 b : Rétrécissement diamétral de rondelles de pomme de terre séchées p 223

Tableau 25 : Taux de Réhydratation (TR) de la pomme de terre (à $27\pm 1^{\circ}\text{C}$) en fonction de la température de séchage et de la taille de découpe. P 232

Tableau 26 : Variation de température de séchage solaire de la pomme de terre et l'oignon

a : Séchage de la pomme de terre et l'oignon de l'épaisseur 5 mm p 239

b : Séchage de la pomme de terre et l'oignon de l'épaisseur 8,0 mm p 240

Tableau 27 : Valeurs des variations de temps, de teneur en eau résiduelle et de vitesse de séchage des tranches d'ail par épaisseur et par température (Annexe2)

Tableau 28 a : Moyenne de la masse initiale et de la variation de masse des 3 essais de l'ail frais p 257

Tableau 28 b : Moyenne de la masse initiale et de la variation de masse des 3 essais de l'ail séché / 22°C p 257

Tableau 29 : Taux de Réhydratation (TR) de l'ail (à $26\pm 2^{\circ}\text{C}$) en fonction de la température de séchage et de la taille de découpe. P 264

Tableau 30 : Variation de température de séchage solaire de l'ail p 270

Tableau 31 : Valeurs des variations de temps, de teneur en eau résiduelle et de vitesse de séchage des rondelles d'oignon par épaisseur et par température (Annexe 2)

Tableau 32 a : Moyenne de la masse initiale et de la variation de masse des 3 essais de l'oignon frais p 288

Tableau 32 b : Moyenne de la masse initiale et de la variation de masse des 3 essais de l'oignon séché p 288

Tableau 33 : Variation de l'épaisseur des rondelles d'Oignon découpées au début et fin séchage (Rétrécissement axial de rondelles d'oignon séchées) p 291

Tableau 34 : Taux de Réhydratation de l'oignon (à $26\pm 2^{\circ}\text{C}$) en fonction de la température de séchage et de la taille de découpe. P 297

Liste des figures

Partie bibliographique

Présentation des légumes

Figure 1: Coupe longitudinale d'une carotte p 12

Figure 2 : Quelques formes de fruit de *Cucurbita pepo* L p 18

Figure 3 : Photo de cotes et feuilles de cardon p 23

Figure 4: Différentes parties de la plante de pomme de terre p28

Figure 5: Différentes vues et coupes de la structure de l'ail p32

Figure 6: Forme des deux groupes d'oignon (blanc et rouge) p 36

Séchage

Figure 1 : Tracé montrant la relation contenu en eau-activité de l'eau d'un produit humide p 47

Figure 2 : Courbes de séchage (a) $X = f(t)$; (b) $dX/dt = f(t)$; (c) $dX/dt = f(X)$ p50

Figure 3 : Répertoire des différentes courbes caractéristiques de séchage p 54

Figure 4 : Représentation schématique d'un solide humide p57

Partie expérimentale

Figure 1 : Photos utilisés dans l'étude : a- carotte ; b- courgette ; c- cardon ; d- pomme de terre ; e- ail ; f- oignon p64

Figure 2: Outils de découpe a) guide à spires avec lame de couteau
b) outil de découpe confectionné de 5,8 ou 12 mm d'épaisseur p 67

Figure 3a : Schéma représentant les différentes parties du sécheur solaire p69

Figure 3 b : Photo du séchoir solaire avec ses deux éléments p70

Figure 4 : Diagramme des différentes étapes de traitement des légumes destinés au séchage p 75

Figure 5 : Dimension et mode de découpe des six légumes étudiés: (a) carotte, (b) courgette, (c) cardon, (d) pomme de terre, (e) ail et (f) oignon p 82

Partie Résultats et discussion

Figure 1a : Courbe du séchage expérimentale avec lissage de rondelles de carotte à 60 °C, de 5,8 mm d'épaisseur; $X_m=f(t_m)$ p 94

Figure 1b : Courbe du séchage de rondelles de carotte à 60 °C, de 5,8 mm d'épaisseur; $X_m=f(t_m)$ p 94

Figure 2 : Représentation des cinétiques de séchage après déduction de $-dX_m/dt$ (a) en fonction de (t_m) et (b) en fonction de (X_m) p 96

Figure 3 b : Effet de la température sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte de 5,8 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(t_m)$ p 99

Figure 3 c : Effet de la température sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte de 5,8 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(X_m)$ p 100

Figure 4a : Effet de la température sur la cinétique de séchage de rondelles de carotte d'épaisseur 8,7 mm ; $X_m= f(t_m)$ p 101

Figure 4 b : Effet de la température sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte de 8,7 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(t_m)$ p 102

Figure 4 c : Effet de la température sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte de 8,7 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(X_m)$ p 102

Figure 5a : Effet de la température sur la cinétique de séchage de rondelles de carotte d'épaisseur 12,9 mm ; $X_m= f(t_m)$ p 104

Figure 5 b : Effet de la température sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte de 12,9 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(t_m)$ p 105

Figure 5 c : Effet de la température sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte de 12,9 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(X_m)$ p 105

Figure 6 b : Effet de l'épaisseur de découpe sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte à 60 °C ; $dX/dt = f(t_m)$ p 108

Figure 6 c : Effet de l'épaisseur de découpe sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte à 60 °C ; $dX/dt = f(X_m)$ p 108

Figure 7 b : Effet de l'épaisseur de découpe sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte à 70 °C ; $dX/dt = f(t_m)$ p 110

Figure 7 c : Effet de l'épaisseur de découpe sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte à 70 °C ; $dX/dt = f(X_m)$ p 110

Figure 8 b : Effet de l'épaisseur de découpe sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte à 85 °C ; $dX/dt = f(tm)$ p 111

Figure 8 c : Effet de l'épaisseur de découpe sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte à 85 °C ; $dX/dt = f(Xm)$ p 111

Figure 9 : Courbe de détermination de l'activité de l'eau (a_w) de rondelles de carotte séchée p117

Figure 10 : Rétrécissement des rondelles de carottes séchées à 60 °C d'épaisseur initiale 5,8 mm (a), 8,7mm (b) et 12,9 mm (c), en fonction du temps et de la teneur en eau résiduelle. p120

Figure 11 : Rétrécissement des rondelles de carottes séchées à 70 °C d'épaisseur 5,8 mm (a), 8,7mm (b) et 12,9mm (c), $f(t)$ et $f(X)$ p 123

Figure 12 : Rétrécissement des rondelles de carottes séchées à 85 °C d'épaisseur 5,8 mm (a), 8,7mm (b) et 12,9 mm (c), $f(t)$ et $f(X)$ p 123

Figure 13 : Photos du suivi des changements de couleur et de forme des rondelles de carotte séchées à 85°C (épaisseur initiale 5,8 ; 8,7 et 12,9mm) p 127

Figure 14 : Evolution de la réhydratation des rondelles de carotte séchées à 60 °C (a) ; 70 °C (b) et 85 °C (c) coupées aux 3 épaisseurs. Pp 129-130

Figure 16 : Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation des rondelles de carotte d'épaisseurs moyennes de 5,8 mm (a) ; 8,7 mm (b) et 12,9 mm(c) p 134

Figure 17 : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation des rondelles de carotte séchées à 60 °C (a) ; 70 °C (b) et 85 °C (c). p 136

Figure 18 : Effet de la température sur la cinétique et Vitesse de séchage de rondelles de courgette d'épaisseur 5,7 mm : (a) $Xm = f(tm)$; (b) $-dX/dt = f(tm)$ et (c) $-dX/dt = f(Xm)$ p 142

Figure 19 : Effet de la température sur la cinétique et vitesse de séchage de rondelles de courgette d'épaisseur 8,4 mm : (a) $Xm = f(tm)$; (b) $-dX/dt = f(tm)$ et (c) $-dX/dt = f(Xm)$ p 143

Figure 20 : Effet de la température sur la cinétique et Vitesse de séchage de rondelles de courgette d'épaisseur 12,3 mm : (a) $Xm = f(tm)$; (b) $-dX/dt = f(tm)$ et (c) $-dX/dt = f(Xm)$ p 145

Figure 21 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et Vitesse de séchage de rondelles de courgette à 60 °C (épaisseur 5,7 ; 8,4 et 12,3 mm) : (a) $Xm = f(tm)$; (b) $-dX/dt = f(tm)$ et (c) $-dX/dt = f(Xm)$ pp 148-149

Figure 22 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et Vitesse de séchage de rondelles de courgette à 70 °C (épaisseur 5,7 ; 8,4 et 12,3 mm) : (a) $X_m = f(tm)$; (b) $-dX/dt = f(tm)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ p 150

Figure 23 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et Vitesse de séchage de rondelles de courgette à 85 °C (épaisseur 5,7 ; 8,4 et 12,3 mm) : (a) $X_m = f(tm)$; (b) $-dX/dt = f(tm)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ p 151

Figure 24 : Détermination de l'activité de l'eau de la courgette sèche p 154

Figure 25 : Taux de rétrécissement des rondelles de courgette séchées à 60°C, d'épaisseur (a) 5,83; (b) 8,65 et (c) 12,6 mm p 155

Figure 26 : Rétrécissement des rondelles de courgettes séchées à 70 °C d'épaisseur 5,7 mm (a) , 8,4mm (b) et 12,3mm (c) , $f(t)$ et $f(X)$ p 156

Figure 27 : Rétrécissement des rondelles de courgettes séchées à 85 °C d'épaisseur 5,7 mm (a) , 8,4mm (b) et 12,3mm (c) , $f(t)$ et $f(X)$ p 156

Figure 28 : Photos du suivi des changements de couleur et de forme des rondelles de courgette séchées à 85°C (épaisseur 5,7 ; 8,4 et 12,3mm) p 160

Figure 29 : Prises de vue de l'évolution de la réhydratation des rondelles de courgette séchées à 60 °C (a) ; 70 °C (b) et 85 °C (c) coupées aux 3 épaisseurs pp 164-165

Figure 30 : Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation des rondelles de courgette de 5,7mm (a) ; 8,4 mm (b) et 12,3 mm (c) d'épaisseur p 168

Figure 31 : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de rondelles de courgette séchées à 60 °C(a); 70 °C (b) et 85 °C (c) p 170

Figure 32 : Effet de la température sur la cinétique et vitesse de séchage de tranches de cardon de 5,8 mm d'épaisseur : (a) $X_m = f(tm)$, (b) $-dX/dt = f(tm)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ p 174

Figure 33 : Effet de la température sur la cinétique et vitesse de séchage de tranches de cardon de 8,8 mm d'épaisseur : (a) $X_m = f(tm)$,(b) $-dX/dt = f(tm)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ p 177

Figure 34 : Effet de la température sur la cinétique et vitesse de séchage de tranches de cardon de 32,0 mm de longueur : (a) $X_m = f(tm)$,(b) $-dX/dt = f(tm)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ p 179

Figure 35 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage de tranches de cardon séchées à 60 °C : (a) $X_m = f(tm)$,(b) $-dX/dt = f(tm)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ p 182

Figure 36 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage de tranches de cardon séchées à 70 °C : (a) $X_m = f(tm)$,(b) $-dX/dt = f(tm)$ et

(c) $-dX/dt = f(X_m)$ p183

Figure 37 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage de tranches de cardon séchées à 85 °C : (a) $X_m = f(t_m)$, (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ p 185

Figure 38 : Mesure de l'activité de l'eau du cardon séché p 189

Figure 39 : Evolution du rétrécissement des tranches de cardon de 5,8 mm d'épaisseur séchées à 70 °C p 190

Figure 40 : Prises de vue du suivi du changement de forme et de couleur des tranches de cardon (5,8 ; 8,8 et 32,0 mm) séchées à (a) 60 °C ; (b) 70 °C et (c) 85 °C. pp 191-193

Figure 41 : Prises de vue du suivi de la réhydratation, reprise de forme et de couleur des tranches de cardon (5,8 ; 8,8 et 32,0 mm) séchées à (a) 60 °C ; (b) 70 °C et (c) 85 °C. p194

Figure 42 : Effet de la température de l'air sur la capacité de réhydratation de tranches de cardon coupées en 5,8 mm (a) ; 8,8 mm (b) et 32,0 mm (c) de longueur et réhydratées dans de l'eau distillée pp 196-197

Figure 43 : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de tranches de cardon séchées à 60 °C (a); 70 °C (b) et 85 °C (c) et réhydratées dans de l'eau distillée à température ambiante pp 198-199

Figure 44 : Effet de la température de l'air sur la cinétique et la vitesse de séchage de rondelles de pomme de terre de 6,3 mm d'épaisseur, (a) $X_m = f(t_m)$, (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ p 204

Figure 45 : Effet de la température de l'air sur la cinétique et la vitesse de séchage de rondelles de pomme de terre de 8,9 mm d'épaisseur, (a) $X_m = f(t_m)$, (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ p 207

Figure 46 : Effet de la température de l'air sur la vitesse de séchage de rondelles de pomme de terre de 12,9 mm d'épaisseur, (a) $X_m = f(t_m)$, (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ p 209

Figure 47 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage de rondelles de pomme de terre séchées à 60 °C, (a) $X_m = f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ p 212

Figure 48 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage de rondelles de pomme de terre séchées à 70 °C, (a) $X_m = f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ p 214

Figure 49 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage de rondelles de pomme de terre séchées à 85 °C, (a) $X_m=f(t_m)$; (b) $-dX/dt =f(t_m)$ et (c) $-dX/dt =f(X_m)$ p 216

Figure 50 : Détermination de l'activité de l'eau de la pomme de terre (a) fraîche et (b) sèche. P 221

Figure 51 : Evolution du rétrécissement de rondelles de pomme de terre de 6,3 mm séchées à 85 °C p224

Figure 52: Prises de vue de changement de forme et de couleur de rondelles de pomme de terre de 6,3 (a) ; 8,9 (b) et 12,9 mm (c) d'épaisseur, séchées à 60 °C p227

Figure 53: Prises de vue de changement de forme et de couleur de rondelles de pomme de terre de 6,3 (a) ; 8,9 (b) et 12,9 mm (c) d'épaisseur, séchées à 70 °C p 228

Figure 54: Prises de vue de changement de forme et de couleur de rondelles de pomme de terre de 6,3 (a) ; 8,9 (b) et 12,9 mm (c) d'épaisseur, séchées à 85 °C p 229

Figure 55: Evolution de la réhydratation de rondelles de pomme de terre de 6,3 (a) ; 8,9 (b) et 12,9 mm (c) d'épaisseur , séchées à 60 °C (a), 70 °C (b) et 85 °C (c) réhydratées à l'eau distillée à température ambiante pp 231-232

Figure 56: Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation de rondelles de pomme de terre séchées de 6,3 (a) ; 8,9 (b) et 12,9 mm (c) d'épaisseur et réhydratées à l'eau distillée à température ambiante pp 233-234

Figure 57: Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de rondelles de pomme de terre séchées à 60 °C (a) ; 70 °C (b) et 85 °C (c) et réhydratées à l'eau distillée à température ambiante p 237-238

Figure 58 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage des rondelles de pomme de terre de 5,0 et 8,0 mm d'épaisseur ; (a) $X_m= f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt =f(X_m)$ pp 242-243

Figure 59 : Effet de la température sur la cinétique et vitesse de séchage des tranches d'ail de 5,9 mm d'épaisseur ; (a) $X_m= f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt =f(X_m)$ p 247

Figure 60 : Effet de la température sur la cinétique et vitesse de séchage des tranches d'ail de 7,8 mm d'épaisseur ; (a) $X_m= f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt =f(X_m)$ p 249

Figure 61 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage des tranches d'ail séchées à 60 °C; (a) $X_m= f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt =f(X_m)$ p 252

Figure 62 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage des tranches d'ail séchées à 70 °C; (a) $X_m= f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt =f(X_m)$ p 253

Figure 63 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage des tranches d'ail séchées à 85 °C; (a) $X_m = f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ p 254

Figure 64 : Détermination de l'activité de l'eau de l'ail p 258
(a) frais et (b) séché. P 258

Figure 65 : Prises de vue de changement de forme et de couleur de tranches d'ail 5,9 (a) et 7,8 (b) mm d'épaisseur, séchées à 60 °C p 261

Figure 66 : Prises de vue de changement de forme et de couleur de tranches d'ail 5,9 (a) et 7,8 (b) mm d'épaisseur, séchées à 85 °C p 261

Figure 67 : Evolution de la réhydratation de tranches d'ail 5,9 et 7,8 mm d'épaisseur, séchées à 60 °C (a), 70 °C (b) et 85 °C (c) réhydratées à l'eau distillée à température ambiante p 263

Figure 68: Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation de tranches d'ail de 5,9 mm (a) et 7,8 mm (b) d'épaisseur, réhydratées à l'eau distillée à température ambiante p 265

Figure 69: Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de tranches d'ail séchées à 60 °C (a) ; 70 °C (b) et 85 °C (c) et réhydratées à l'eau distillée à température ambiante pp 268-269

Figure 70 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage des tranches d'ail de 5,2 et 8,03 mm d'épaisseur ; (a) $X_m = f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ pp 271-272

Figure 71 : Prises de vue de changement de forme et de couleur de tranches d'ail 5,2 (a) et 8,03 (b) mm d'épaisseur, séchées au séchoir solaire p 273

Figure 72 : Effet de la température sur la cinétique et vitesse de séchage des rondelles d'oignon de 6,0 mm d'épaisseur ; (a) $X_m = f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ p 276

Figure 73 : Effet de la température sur la cinétique et vitesse de séchage de rondelles d'oignon de 8,3 mm d'épaisseur ; (a) $X_m = f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ p 279

Figure 74 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage de rondelles d'oignon séchées à 60 °C; (a) $X_m = f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $dX/dt = f(X_m)$ p 282

Figure 75 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage de rondelles d'oignon séchées à 70 °C; (a) $X_m = f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ pp 283-284

Figure 76 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage de rondelles d'oignon séchées à 85 °C ; (a) $X_m = f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ p 285

Figure 77 : Mesure de l'activité de l'eau de l'oignon à l'état frais et séché dans des solutions de H_2SO_4 à humidité relative d'équilibre (HRE) variées p 289

Figure 78 : Evolution du rétrécissement de rondelles d'oignon de 6,35 mm d'épaisseur séchées à 60 °C p 292

Figure 79 : Prises de vues de l'évolution du changement de forme et de couleur des rondelles d'oignon de 6,0 et 8,03 mm d'épaisseur , séchées à 60 , 70 et 85 °C. p 295

Figure 80 : Evolution de la réhydratation de rondelles d'oignon de 6,0 et 8,03 mm d'épaisseur , séchées à 60 °C (a), 70 °C (b) et 85 °C (c). p 296

Figure 81 : Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation de rondelles d'oignon de 6,0 mm (a) et 8,3 mm (b), réhydratées à l'eau distillée à température ambiante p 298

Figure 82 : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de rondelles d'oignon séchées à 60 °C (a) ; 70 °C (b) et 85 °C (c) et réhydratées à l'eau distillée à température ambiante pp 300-301

Figure 83 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage des rondelles d'oignon de 5,0 et 8,0 mm d'épaisseur ; (a) $X_m = f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$ pp 305-306

Liste des abréviations

aw : activité de l'eau des légumes

HR %: humidité relative de l'air de séchage

i * : humidité relative de l'air qui entoure le produit au cours du séchage

ép. : épaisseur de découpe des légumes

épi : épaisseur initiale de découpe des légumes

épf : épaisseur finale en fin de séchage des morceaux de légumes

di : diamètre initial des rondelles de découpe des légumes

df : diamètre finale des rondelles en fin de séchage

HRE % : humidité relative d'équilibre de l'atmosphère

i : en indice correspond à l'état initial

f : en indice correspond à l'état final

m : masse de prise d'essai ou d'échantillon de légume

Δ : indique la variation entre un état initial et un état final

Ta: température de l'air sec de séchage exprimée en °C

Th: température du thermomètre humide correspond à la température de saturation (°C)

H : enthalpie de l'air exprimée en kJ/kg d'air sec

t ou tps : temps ou durée (en minute ou heure)

T : température (en °C)

Mt : million de tonne

ha : hectare (unité de surface agricole)

g : gramme (unité de mesure de poids)

mg : milligramme (sous-unité du gramme = 10^{-3} g)

μ g : microgramme (sous-unité du gramme = 10^{-6} g)

kcal: unité de mesure de l'énergie

m : mètre (unité de longueur)

cm : centimètre (sous-unité du mètre = 10^{-2} m)

mm : millimètre (sous-unité du mètre = 10^{-3} m)

m³ : mètre cube (unité de volume = 10^3 litre)

MJ: Mégajoule (unité de mesure de l'énergie, multiple du Joule = 10^6 Joule).

I/ ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION

La production de nombreuses denrées alimentaires périssables est saisonnière. Ces denrées ne sont disponibles que pendant une partie de l'année, assez brève, qui est insuffisante pour absorber les excès de production par le marché, d'où la nécessité de transformer et de conserver l'excédent afin d'éviter le gaspillage et les pertes.

En raison du caractère saisonnier de la production, la conservation des légumes et des fruits sur de longues durées impose la mise en œuvre de traitements spécifiques permettant l'inactivation des enzymes tissulaires et des microorganismes et la protection contre les contaminations ultérieures (COLAS, 2003).

Les méthodes modernes de conservation et de stockage tels que la réfrigération et la congélation sont largement utilisées dans les pays développés, ce qui n'est pas le cas dans les pays dits en voie de développement (BURDEN & WILLS, 1992).

Près de la moitié de la population du tiers monde n'a pas accès à des vivres suffisantes; les pertes alimentaires qui se produisent après la récolte et au cours de la commercialisation sont très importantes dans ces pays et où le besoin se fait le plus sentir. Parmi les produits alimentaires d'origine végétale qui subissent le plus de pertes, ce sont les produits dits périssables à savoir racines et tubercules, fruits et légumes (BURDEN & WILLS, 1992).

Ils constituent une part importante de notre alimentation, consommés sous forme de produits frais ou transformés (surgelés, conserves, produits fermentés), à l'état cru ou après cuisson, ou sous une nouvelle forme ; frais lavés, découpés, emballés et prêts à être consommés ; produits dits de 4^{ème} gamme (TIRILLY et THOUVENOT, 1988), ou conservés par fermentation lactique (carotte, navets, céleri, poivrons, haricots verts...) (LE GUERN, 1989).

BIMBENET et TRYSTRAM (1993) rappellent que le Génie des Procédés Alimentaire traitant des opérations de transformation de la matière s'est montré très fructueux pour faire passer la technologie alimentaire de l'artisanat au modèle industriel.

Pour réussir la transformation et la conservation des produits frais, les méthodes qui se prêtent le mieux à ces opérations sont la dessiccation, la conservation chimique et le traitement thermique (BURDEN & WILLS, 1992).

Parmi les méthodes physiques de préservation et de conservation des denrées alimentaires, il y'a le séchage qui est une technique utilisée depuis l'antiquité. Le séchage est un des plus anciens moyens de conservation avec la fermentation (CLERGEAND CHANTAL et

LIONEL, 1997). Nos aïeux séchaient leurs gibiers et leurs produits de culture à l'air libre ou au soleil dans les périodes fastes pour reporter leur consommation aux saisons disgracieuses. Depuis l'évolution de la science et les révolutions technologiques, des équipements et appareils ont été conçus et élaborés pour mener à bien cette opération unitaire de façon contrôlée (BIMBENET, 1984).

La concentration, la dessiccation, le séchage, la déshydratation et la lyophilisation, sont des termes qui se regroupent sous le terme général d'«élimination d'eau». Toutes ces opérations obéissent aux mêmes lois et ont les mêmes objectifs. Le séchage part d'un produit liquide ou solide pour aboutir à un solide. C'est un procédé de conservation qui privant l'aliment d'eau libre, interdit toute activité microbienne ou enzymatique (MAFART, 1991).

En dehors de son premier objectif qui est la conservation, l'élimination d'eau, il permet de réduire la masse et le volume des aliments (alléger le produit), et la conservation par diminution de l'«activité de l'eau». Le procédé permet aussi de donner une présentation particulière (paillettes de purée de pomme de terre, café lyophilisé); entraînant des économies d'encombrement et de transport conséquentes (BIMBENET, 1984 ; MAFART, 1991)

La place qu'occupe le séchage dans la chaîne agro-alimentaire est très variée. Entre autres des produits agricoles très hydratés, exigeant le séchage pour être stabilisés et allégés ; les légumes et assimilés (pomme de terre/ flocons, carottes, oignons, asperges, haricots, lentilles, tomates, champignons, etc..., pour utilisation ménagère ou industrielle) (BIMBENET, 1984).

En revanche, le séchage modifie le produit dans sa forme, sa texture, son goût, ses qualités nutritionnelles, ce qui est souvent considéré comme un inconvénient ; et il est coûteux en énergie notamment.

Lors du séchage, l'évaporation de l'eau provoque des phénomènes physicochimiques et mécaniques plus ou moins désirables dont dépendent les qualités du produit (ex : produit croustillant, déformé, décoloré, etc.) et son aptitude à la réhydratation (BIMBENET et coll. 2002 b).

Dans la plupart des cas, le stockage des produits séchés est suivi d'une réhydratation, que ce soit dans un procédé industriel, dans la cuisine, voire dans la bouche du consommateur final. L'utilisation des produits séchés est très variée, les morceaux de légumes peuvent être utilisés pour entrer dans la composition de potages ou de poudres pour formuler des sauces... (BIMBENET et coll. 2002 b).

Traditionnellement, certains groupes de populations algériennes utilisent la chaleur du soleil pour sécher et déshydrater les denrées alimentaires périssables dans les périodes de grande production agricole, en vue de les conserver pour une consommation ultérieure.

Le développement de l'industrie agro-alimentaire dans notre pays, les exigences du marché et du consommateur font que les industriels pouvant s'intéresser au procédé de séchage pour son application sur des denrées alimentaires d'origine végétale dans le but de faciliter leur transport d'une région à une autre et même les destiner à l'exportation. Ce qui permettra de livrer des produits de qualité satisfaisante ayant résistés aux aléas de transport et de manutention avec une durée de vie plus longue et ainsi limiter leur pourrissement précoce.

Pour répondre à ces attentes, notre travail, entre dans le cadre d'un projet de recherche, qui consiste à étudier le séchage en vue de conserver des matériaux solides alimentaires d'origine végétale dont le mode utilisé est le séchage par convection d'air chaud.

Le séchage comme alternative de conservation, permet d'alléger le produit de son poids, diminue l'activité de l'eau, par conséquent, réduit les réactions chimiques et biochimiques, et inhibe le développement des micro-organismes qui détériorent l'aliment et ceux nuisibles au consommateur.

L'objectif de notre travail consiste à sécher six légumes dont la consommation est courante par la population algérienne: la carotte, la courgette, le cardon, l'ail, l'oignon et la pomme de terre, par convection d'air chaud dans un sécheur armoire à ventilation forcée à différentes températures, découpés à différentes épaisseurs.

Étudier le comportement des six légumes au cours du processus par le suivi:

- de la cinétique de vitesse de séchage, en variant la température et les dimensions des produits étudiés,
- du rétrécissement et changement de forme
- du changement de la couleur
- de l'aptitude du produit séché à la réhydratation.

Le deuxième volet du travail consiste en une conception d'un sécheur solaire fonctionnant en discontinu avec séchage indirect par convection d'air naturelle. Dans celui-ci nous avons réalisés des essais de séchage sur certains de ces légumes avec suivi de leur cinétique de vitesse de séchage pour compléter notre étude et faire éventuellement une comparaison entre les deux modes de séchage.

A/ Rappels : Eau et évolution des légumes après récolte

1-L'eau dans le tissu végétal

Un végétal frais, en dépit d'une teneur en eau très élevée, n'en relargue aucune quantité. Elle est retenue en totalité par les tissus. Cette notion de rétention recouvre des degrés de liaisons très différents, selon COLAS (2003), il est distingué :

-Une eau structurée connue sous le nom d'eau liée. Dans cette fraction, se trouve l'eau fixée par solvatation dans le cas de groupements ionisés et par liaisons hydrogènes dans le cas de groupements polaires, l'eau organisée au voisinage de domaines hydrophobes, ainsi qu'une eau incluse dans des espaces capillaires de très petites dimensions. Dans les tissus végétaux, la teneur en eau liée est de l'ordre de 0,2 g/g de matière sèche.

-Une eau immobilisée par adsorption, imbibition et capillarité. Dans cette fraction on trouve une eau de constitution -eau d'imprégnation du cytoplasme- et une eau de circulation qui se déplace librement dans différentes structures tissulaires (parois, vacuoles, méats, vaisseaux).

Ces deux fractions non permanentes, contribuent à la structuration du tissu, donc à ses caractéristiques de texture. Cependant la seconde joue un rôle prépondérant, par sa quantité. Au niveau de l'ensemble du tissu, les échanges d'eau et de solutés entre cellules se font, soit par diffusion à travers les parois, soit directement en établissant une connexion de plasmalemme entre les cytoplasmes de deux cellules voisines. Les échanges avec le milieu environnant sont facilités par le caractère hydrophile des parois (COLAS, 2003).

La partie de l'eau dosable (eau libre) n'a pas les mêmes propriétés que le reste, car elle reste fixée sur les macromolécules par forces de Van Der Waals et liaisons hydrogènes. Selon l'état de l'eau (libre, d'hydratation ou liée), les propriétés physiques et chimiques varient (ALAIS et coll. 2004).

Pouvoir structurant de l'eau

L'eau qui représente le constituant le plus important de tous les êtres vivants, donne à la matière vivante sa fluidité ce qui facilite les échanges et mouvements dans la cellule, elle est indispensable aux phénomènes osmotiques et aux échanges thermiques. La teneur en eau des aliments est très variable : 10 à 20% dans les céréales, 60 à 75 % dans les viandes et les chairs d'animaux, 80 à 96 % dans les fruits et légumes frais (ALAIS et coll. 2004).

La texture des légumes est une composante majeure de leur qualité, elle fait partie des critères de choix de qualité au même titre avec le calibre, la couleur, l'aspect et la flaveur. Les

propriétés mécaniques et fonctionnelles des végétaux résultent non seulement de leur composition, de la structure et des propriétés physicochimiques du tissu, mais aussi des propriétés structurantes de l'eau dans les tissus (COLAS ,2003).

2- Classification des fruits et légumes

Les fruits et légumes en tant que denrées alimentaires, se distinguent selon la nature de la partie comestible de la plante ; les légumes racines, bulbe, tubercule, tige, feuille, fleur, fruit et graines (TIRILLY et THOUVENOT, 1988 ; BURDEN & WILLS ,1992).

a- Racines et tubercules : parties souterraines de la plante où sont emmagasinés les éléments nutritifs, c'est surtout de l'amidon (pomme de terre), et des sucres dans les tubercules provenant de racines pivotantes (carottes, navets).

b- Fleurs comestibles : tels que brocoli, chou fleurs.

c- Formation herbacée : légumes verts d'importantes sources de sels minéraux, de vitamines et de fibres, sont très variables d'aspect ; base renflée de la feuille : oignons (y compris les oignons à bulbe sec) ; poireaux.

d- Organes reproducteurs : organes porte grains dont on consomme surtout les parties charnues ; tels que concombre, poivron, aubergine (BURDEN & WILLS ,1992).

3-Evolution après récolte

3-1-Physiologie des légumes

Les végétaux verts en cours de croissance utilisent l'énergie que leur fournit la lumière solaire captée par leur feuilles pour fabriquer des sucres en combinant les gaz carboniques de l'air avec l'eau qu'ils puisent dans le sol par leur racines : c'est la photosynthèse.

La plante emmagasine les sucres tels quels, ou bien elle les combine en chaînes longues pour former de l'amidon. Les sucres et amidons (hydrates de carbone) sont emmagasinés dans diverses parties de la plante et utilisés par la suite pour fournir de l'énergie nécessaire à la poursuite de la croissance et à la reproduction (BURDEN & WILLS ,1992).

3-2-Détériorations physiologiques après récolte

Après cueillette, les processus vitaux des produits frais se poursuivent, ils subissent un processus de vieillissement rapidement suivi de décomposition.

Le taux de pertes augmente sous l'effet de la température élevée, la faible humidité atmosphérique, les lésions physiques et contaminations (BURDEN & WILLS ,1992).

L'ensemble du métabolisme, entraîne des changements de coloration de la peau, un ramollissement du à la dégradation des composés pectiques insolubles en produits solubles (TIRILLY et THOUVENOT ,1988).

Les principaux processus sont ; la respiration et la transpiration (BURDEN & WILLS ,1992).

3-2-1- Respiration

C'est le processus par lequel les plantes absorbent de l'oxygène et rejettent du gaz carbonique. L'oxygène de l'air décompose les hydrates de carbone (substrats de réserve) de la plante en gaz carbonique et en eau, cette réaction produit de l'énergie sous forme de dégagement de chaleur (BURDEN & WILLS ,1992 ; TIRILLY et THOUVENOT, 1988).

La carotte dégage beaucoup plus de chaleur que les fruits et légumes « feuilles », et elle est très sensible au flétrissement (TIRILLY et THOUVENOT, 1988).

Le tubercule de pomme de terre, perd de l'eau par transpiration sous forme de vapeur dès qu'il est extrait de la terre, il tend à se flétrir et perdre du poids, l'intensité respiratoire croit avec la température (ELLISSECHE, 1999).

3-2-2- Transpiration ou perte d'eau

La plupart des produits frais récoltés contiennent 65 à 95 % d'eau. Elle est absorbée dans le sol sous forme liquide par les racines, passe dans les tiges et se dégage sous forme de vapeur d'eau, par les parties aériennes (des feuilles). Ce passage de l'eau s'appelle « courant de transpiration ». Il maintient la teneur en eau élevée de la plante et la pression ainsi créée contribue à la soutenir (BURDEN & WILLS ,1992).

Les produits frais continuent à perdre de l'eau après récolte (lors de la transpiration) ce qui entraîne une rétraction et une diminution de poids (BURDEN & WILLS ,1992 ; TIRILLY et THOUVENOT, 1988).

Les légumes racines sont très sensibles aux pertes d'eau, ils doivent être débarrassés de leurs feuilles. Leur sensibilité dépend aussi du stade de récolte ; plus ils sont récoltés précocement, plus ils sont sensibles au flétrissement (carotte : très sensible et courgette : sensible) (TIRILLY et THOUVENOT, 1988).

4-Intérêt et effet du froid

Les trois composantes de la réfrigération sont ; la température, la composition de l'atmosphère et l'humidité de cette dernière. Ces facteurs doivent être judicieusement utilisés

pour éviter les altérations diverses au cours du stockage (COME, 1991). la conservation des végétaux, par l'emploi d'un froid modéré, réduit l'activité métabolique. Ceci se traduit par une moindre dégradation des réserves des organes et une plus faible production de chaleur respiratoire (COME, 1991). Il réduit les pertes d'eau (TIRILLY et THOUVENOT, 1988).

Les conditions recommandées pour la conservation de quelques légumes sont rassemblées dans le tableau n°1 suivant:

Tableau 1: Conditions de conservation au froid recommandées pour quelques légumes

Produit	T (°C) (1)	T (°C) (2)	HR (%) (1)	HR (%) (2)	DPC* (2)
Oignon (sec) ⁽²⁾	-1 à 0	0	70-80	65-70	6-8 mois
Carotte	0 à 2	0	> 95	95	5-6 mois
Courgette	7 à 10		>95		
P de terre					
-pour chips	10		>95		
-de primeur	4 à 5		>95		
-conservation	7	2-3	90-95	90-95	5-8 mois
Ail		0		65-70	6-7 mois

(1) TIRILLY et THOUVENOT, 1988 (d'après Ministry of agriculture, 1979);

(2) COME, 1991 ; DPC*:Durée pratique de conservation

5-Consommation des légumes

Elle est influencée par leurs vertus alimentaires, nutritives et parfois curatives. La valeur énergétique des légumes varie selon les espèces, mais elle est globalement faible en raison de fortes teneurs en eau et d'une absence assez générale de lipides et de teneurs modérées en glucides (courgette : 11 Kcal/100g ; ail : 134 Kcal/100g) (CHAUX & FOURY, 1994).

Les teneurs en éléments nutritifs majeurs sont:

-Teneurs en glucides disponibles : très variable, les légumes secs et tubercules (22 à 25%); oignon, pois de conserve, salsifis atteignent des niveaux glucidiques rencontrés dans les fruits (courgette : 2,0%, carotte crue : 6,3% et oignon : 5,2/6,8%(cru)).

-Lipides : teneur extrêmement faible (0,1 à 0,3 g/100g de produit comestible).

-Protides : très variable selon les espèces (courgette : 0,6%, ail : 6%), avoisine celle des fruits.

-Fibres alimentaires : ramenée à la matière sèche (MS), la richesse en fibres des légumes est plutôt élevée : 15 à 30 % pour les mieux pourvus, 6 à 15 % pour les plus pauvres. Ce sont des

polysaccharides peu ou pas dégradables, sauf hémicellulose (courgette : 0,9 %, carotte crue : 2,4 %).

-La teneur en éléments minéraux est variable, non négligeable ; Ca, Mg, Fe, K et phosphore (CHAUX & FOURY, 1994).

-Les teneurs en vitamines : Les légumes ne contiennent pas la vitamine A proprement dite ou rétinol, mais beaucoup sont riches en carotène β , α ou γ qui, sous l'effet de la caroténase intestinale donnent du rétinol I.

Il en résulte que leur action vitaminique n'atteint que le 1/6^{ème} de la teneur en carotène.

Les 2 espèces les plus riches en carotènes sont : le persil (7000 $\mu\text{g}/100\text{g}$) et, surtout la carotte (environ 8200 $\mu\text{g}/100\text{g}$) (CHAUX & FOURY, 1994).

Etant donné, son rôle d'oxydo-réducteur, l'acide ascorbique (Vitamine C) est particulièrement abondant dans les feuilles vertes (cresson, fenouils, chou de Bruxelles..). La teneur des fruits varie beaucoup selon l'espèce ; la fraise, la tomate et surtout le piment, en sont bien pourvus. Les différentes variétés peuvent être marquées pour la tomate, chez les piments les types piquants sont généralement les mieux pourvus.

Les effets anti-oxydants de certaines vitamines (E, C et β -carotène) sur au moins trois pathologies ; cancers, troubles cardio-vasculaires et infections, ont fait qu'il y a eu de nombreux travaux sur les vitamines et leur valeur diététiques.

Les légumes et les fruits sont nos principaux fournisseurs en vitamines, excepté pour la vitamine B12 d'origine exclusivement animale et la D.

Les teneurs en vitamines A, B, C, E (mg/kg consommable) des légumes les mieux pourvus, selon Régali INRA (cité par CHAUX & FOURY, 1994) :

vitamines	A	B6	B5	PP=B3	C
Carotte cuite	16.7	--	2.2	--	--
Carotte crue	19.2	1.5	2.5	9	--
Piment cru	1.2	--	1.9	7	1260

6- Principaux débouchés industriels des légumes

Le mode de consommation des légumes, a été fortement influencé par le développement des différentes formes de traitements industriels, dont certains ne sont pratiquement plus achetés à l'état frais. Il s'agit particulièrement de ceux qui requièrent des temps d'épluchages dissuasifs, des lavages délicats ou des cuissons longues. (CHAUX & FOURY, 1994).

Méthodes de conservation et traitements après récolte

Les légumes destinés à différentes filières industrielles qui les transforment en une large gamme de produits alimentaires:

*livrés ; épluchés, coupés, assortis, leur permettant d'être immédiatement cuisinés ou consommés en l'état ;

*de permettre, une utilisation différée sur une durée variable, selon le type de produit (CHAUX&FOURY, 1994).

La déshydratation est l'extraction d'une partie de l'eau de constitution par chaleur sèche ou lyophilisation, sous vide partiel. Ces deux techniques intéressent une douzaine de produits dont les légumes pour potages (CHAUX & FOURY, 1994).

B- Les légumes destinés au séchage

1-Carotte

La carotte, appartenant à la famille des Apiacées (ombellifères) et genre *Daucus carota L.* (CHAUX et FOURY ,1994 ; RENAUD, 2003) est une plante à racine bisannuelle, cultivée en annuelle (Encyclopédie de la cuisine, 1999 ; RENAUD, 2003).

La carotte est, cultivée pour sa racine, utilisée en alimentation humaine et animale. (CLEMENT ,1981), pour sa valeur diététique, liée surtout à sa teneur en vitamine A (11000 UI), sa valeur appréciée et ses modes de consommation variées (CHAUX et FOURY ,1994).

Elle offre de multiples qualités nutritionnelles; crudité par excellence, aliment primordial du tout petit, se maintient dans les premiers rangs des légumes de grande consommation (VILLENEUVE ,1999). Ainsi, la carotte est le légume racine le plus consommé dans le monde (CHAUX et FOURY ,1994).

1-1-Origine et présentation générale

1-1-1-Origine et évolution

A l'origine se trouvent des formes plus ou moins anthocyanées (violet clair à rouge noir) de l'Afghanistan (CHAUX et FOURY ,1994 ; RENAUD, 2003). Elle se répandit, vers l'Est ; Chine (1300 av.J C), Japon (1600) et l'Ouest ; Asie mineure (700) et l'Espagne (par les Arabes, 1000-1100) (CHAUX et FOURY ,1994).

La texture de la carotte s'est améliorée et acquit sa couleur orangée au milieu du 19^{ème} siècle (Encyclopédie de la cuisine, 1999), L'amélioration génétique, a permis l'obtention de très

haute qualité, largement justifiée par le développement de la consommation de ce légume à l'état cru. On a amélioré la teneur en carotène, la coloration uniforme (collet et cœur) tout en conservant la tendreté. La création de F1 a permis un progrès considérable en qualité et rendement (CHAUX et FOURY ,1994).

1-1-2-Situation économique

Selon les sources de la FAO 1988, (CHAUX et FOURY ,1994), la production annuelle mondiale est de 13 millions de tonne de carotte; ce qui fait arriver cette espèce en 5^{ème} position parmi les légumes. La production de l'Afrique est 4 %, essentiellement dans l'hémisphère nord. La production mondiale a évolué pour atteindre 14 Mt selon VILLENEUVE (1999).

La production de la carotte de l'année 2003 est présentée dans le tableau 2.

La production au niveau de la wilaya de MILA est 19 125 quintaux pour l'année 2004-2005 pour une surface cultivée de 143,5 hectare (ha) ,en 2005-2006 ,elle est de 26 870 quintaux pour une surface de 204,5 ha (Direction de l'agriculture de MILA).

Tableau 2 : Production mondiale de la carotte de l'année 2003

PAYS	PRODUCTION EN 2003 (tonnes)
Production mondiale	23 321 456
Chine	8 126 460
États-Unis	1 900 110
Russie	1 735 260
Pologne	834 621
France	681 528
Japon	630 000
Royaume-Uni	587 300
Italie	577 811
Maroc (13 ^{ème})	332 210

Source: Données FAOSTAT, année 2004. (Microsoft ® Encarta ® 2007. © 1993-2006 Microsoft Corporation).

1-2-Morphologie et développement de la plante

La carotte est plus ou moins allongée ou trapue, selon les variétés. Sa couleur peut être orangée, blanche, jaune, rouge, pourpre ou noire (Encyclopédie de la cuisine, 1999). Selon RENAUD (2003) c'est une racine longue, pivotante et charnue.

1-2-1-Evolution de la composition biochimique

§ Composition de la racine en sucres solubles

La composition glucidique soluble de la racine de carotte a révélé la présence de saccharose, de glucose, de fructose et en moindre quantité ; du galactose et du raffinose. Le saccharose est de loin la forme glucidique de réserve majeure dans la racine.

La charge totale de sucres solubles augmente progressivement au cours de la période de croissance de la racine .Cependant, selon VILLENEUVE (1999), la teneur en sucres réducteurs (glucose et fructose) diminue au cours de cette période d'après analyse des sucres. Le saccharose s'accumule rapidement jusqu'à atteindre environ 5,5% du poids frais (Le DILY et *al.*, 1994 cités par VILLENEUVE, 1999) .Il en résulte une augmentation régulière du rapport saccharose / réducteurs.

§ Evolution de la teneur en caroténoïdes

Les carotènes (sources de provitamine A) sont à l'origine de la pigmentation orangé de la racine de carotte et reflètent ainsi un indice de qualité alimentaire du produit. Le β et l' α -carotène représentent environ 90% des caroténoïdes totaux.

La production de carotène dans la racine est caractéristique de la phase de maturation. Leur concentration augmente graduellement jusqu'à un maximum de leur synthèse dans les cellules des tissus matures (VILLENEUVE ,1999).

§ Evolution de la teneur en fibres totales

Du point de vue nutritionnel, les « fibres » végétales peuvent se définir comme étant la fraction organique insoluble non digestible par les enzymes animales. Au cours de la période de croissance, VILLENEUVE (1999) rapporte, une diminution de la teneur en fibres (hémicellulose, cellulose, lignine). Cette diminution est engendrée par une augmentation considérable de la matière sèche soluble (sucres totaux, carotène), que la racine enregistre au cours de cette période (ROBERTSON et *al.*,1979 cités par VILLENEUVE ,1999).

1-3-La plante

1-3-1-Phases de développement

La phase de tubérisation durant laquelle la croissance de la plante ne concerne pratiquement plus que la racine. La tubérisation ne s'opère que dans la partie supérieure de la racine et concerne une longueur bien définie : 25-30 cm pour les types longs. Elle peut se faire de

manière isodiamétrique (carotte cylindrique) ou décroissante à partir du collet (racines coniques).

La carotte est un légume fragile par :

-sa forte teneur en eau : 9 à 11% de MS contre 17 à 22% pour la pomme de terre et 17 à 23 % pour la betterave industrielle ;

-son épiderme sans liège protecteur ;

-sa morphologie cylindrique et la réduction, par sélection, de toutes les formations fibreuses.

Le pourcentage de racines cassées (donc invendables) en bout de chaîne d'arrachage-conditionnement atteint des valeurs élevées (jusqu'à 50%) (CHAUX et FOURY ,1994).

1-3-2-Morphologie de la racine au moment de la récolte

La partie de la carotte que nous consommons est la racine « principale » pivotante de la plante. Il est possible de différencier, à l'intérieur d'une racine mature plusieurs zones (figure1) ;

*une zone très mince à l'extérieur, véritable épiderme de la racine, appelée « périderme » ;

*une zone intermédiaire constituée par le phloème, dénommée dans le langage courant « chair de la carotte » ;

*un anneau mince constitué des assises génératrices qui constituent le cambium ;

*enfin une zone centrale qui correspond au xylème de la racine.

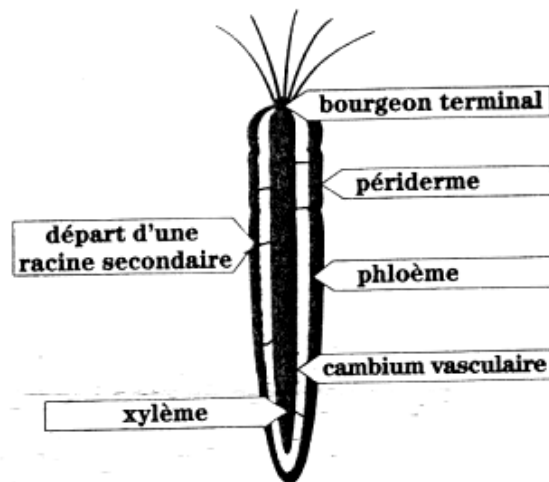


Figure 1 : Coupe longitudinale d'une carotte (VILLENEUVE et LETEINTURIER .1992 cités par VILLENEUVE .1999)

1-3-3- Calibrage

La classification des carottes fait intervenir la forme et la couleur, le principal critère est la longueur (CHAUX et FOURY ,1994 ; VILLENEUVE, 1999) selon ce qui suit : carottes longues ; demi longues et demi courtes.

1-4-Facteurs de l'environnement

La carotte s'adapte à tous les climats. Elle supporte les faibles gelés, la température optimale de croissance (air et sol) semble se situer aux environs de 16 à 18 °C (CHAUX et FOURY ,1994). C'est une plante de climat tempérée qui ne doit pas souffrir de sécheresse (CLEMENT, 1981, RENAUD, 2003).

Les racines ne se développent que dans des sols légers (CLEMENT ,1981), souples, homogènes, drainant et bien profonds, éviter les sols lourds retenant l'eau (risque de pourriture) et caillouteux (déformation des racines) (VILLENEUVE ,1999).

Un pH de 6 à 7.5 semble convenable, au dessous de 5.5, il y a risque de carence en calcium très élevé .La carotte supporte modérément la salinité (CHAUX et FOURY ,1994 ; VILLENEUVE ,1999).

1-5-Récolte et conservation

La récolte se fait par arrachage du légume selon les besoins, en commençant par les plus gros pour laisser l'espace aux autres (CLEMENT ,1981). Le temps entre l'installation et la récolte est de 2 à 3 mois pour les primeurs et 5 à 6 mois pour la conservation en novembre, les ressuyer sur le sol sans les laver, et couper les fanes (RENAUD, 2003).

La conservation est assurée sur l'aire de culture, en silo et en chambre froide:

- par maintien dans le sol en procédant à un effeuillage préalable (CHAUX et FOURY ,1994)
- la conservation en silo est utilisée, en conservant les racines en silos tombes (ou cave) (RENAUD, 2003) bien ventilées, après avoir été nettoyées et bien décolletées, elles peuvent se garder en hiver jusqu'en avril (CLEMENT ,1981 ; CHAUX et FOURY ,1994).
- La conservation en chambre froide est adoptée pour assurer un étalement des ventes. Elle permet le maintien des qualités gustatives et organoleptiques (stabilisation de la formation des sucres, fibres et carotène. Elle est limitée par les conditions de température (0 °C -0,5 °C), hygrométrie 95-98 %.

1-6-Composition

La carotte se distingue par une teneur relativement élevée en caroténoïdes, en particulier le β - carotène. Cette provitamine A, contribue à la couleur orange, protège des troubles de la vision (VILLENEUVE ,1999 ; Encyclopédie de la cuisine, 1999) et maintient en bon état les tissus de l'organisme, notamment la peau et les branches (VILLENEUVE ,1999). On lui reconnaît de nombreuses propriétés médicinales, diurétique, reminéralisante, vermifuge, antidiarrhéique, tonique et antianémique. Son jus hautement régénérateur semble particulièrement bénéfique pour le foie (Encyclopédie de la cuisine, 1999).

Une large utilisation pour sa richesse en provitamine A (β -carotène) sous différentes formes, crue ou cuite, dans les salades, les soupes, ainsi que par l'industrie pour l'appertisation, la congélation, la déshydratation, la fabrication de jus et même comme aliment pour animaux (VILLENEUVE ,1999)

Le contenu vitaminique de la carotte est très dépendant du type variétal. L'écorce étant plus riche que le « cœur », la quantité totale est liée à la teneur de chacune des parties, mais, aussi à leur importance relative. Il existe ainsi une corrélation positive entre le rapport pondéral écorce/cœur et le poids de carotène pour la racine entière (CHAUX et FOURY, 1994).

La carotte constitue une importante source de sucres et de vitamines (notamment A, B, C), et prend une large part dans la nutrition des enfants ses fibres sont particulièrement bien adaptés par l'organisme et sont moins agressives que celles des céréales. De ce fait, sa consommation est favorable dans le cas des gastrites et d'ulcères. Ainsi sa valeur alcalinisante permet de combattre les acidoses aiguës ou chroniques (VILLENEUVE ,1999).

La carotte renferme des réserves considérables de sucres, principalement du saccharose et des sucres simples tels que glucose et fructose. Sa teneur en sucres solubles varie en fonction de la variété et de l'époque de récolte, de 2 à 8 g pour 100 g de carotte fraîche. Ces sucres participent pour une large part au plaisir gustatif.

Il est noté la présence de quelques Acides Aminés (AA) libres (glutamique), des substances terpéniques et phénoliques qui interviennent dans l'agrément gustatif des préparations de ce légume (VILLENEUVE ,1999).

La composition chimique de la carotte crue et séchée est présentée dans le tableau 3.

Tableau 3 : Composition chimique de la carotte crue, et séchée:

Composants (g)	Crue1	2	séchée 2	Minéraux (mg)	1	2	séchée 2	Vitamines (mg)	Crue1	2	séchée 2
Eau	89,2	87,5-92,1	9,4	Minéraux (g)		0,86	5,55	C	7	7	19
Protéines	0,8	0,98	6,82	Na	35	60	495	Niacine	0,6		
Glucides -sucres -Amidon	6,6	4,8	36,82	Mg	10	18	-	B6	0,16	270 (µg)	144 (µg)
	6,4	-	-	P	16	35	103	Folates (µg)	30	55	
	0,2	-	-	K	286	290	2,64 (g)	Rétinol équ	-	1,57	15,55
Fibres	2,6	3,63	38,01	Ca	27	41	256	Caroténoïdes totaux	-	11,10	93,30
Lipides	0,3	0,20	1,45	Fe	0,3	2,10	4,70	α-carotène	-	3,31	-
Energie STD (kcal)	31	25,7	193,46	Proportion comestible	0,89			β-carotène	-	7,79	93,30

1:FAVIER et coll. (1995) ; 2: SOUCI et coll. (1994)

2-Courgette

La courgette est le fruit d'une plante potagère annuelle à tige herbacée, de la famille des Cucurbitacées (CLEMENT ,1981 ; RENAUD, 2003), et du genre *Cucurbita sp.* (CHAUX et FOURY, 1994 ; ERARD, 2002), qui est utilisée pour l'alimentation.

La courgette fait partie du groupe des courges (genre ; *Cucurbita*) qui comprend trois espèces botaniques cultivées, *Cucurbita maxima* ou potiron, *Cucurbita moschata* ou courge musquée et *Cucurbita pepo* ou courge pépon où l'on trouve la courge d'Italie ou courgette. Cette dernière se distingue par ses fruits qui ont une croissance extrêmement rapide et qui sont consommés jeunes ; au 1/4 ou au 1/3 de leur développement définitif (ERARD, 2002).

2-1-Origine et présentation générale

2-1-1-Origine et évolution

Les espèces du genre *Cucurbita* se regroupent sous le nom de courge, toutes d'origine de l'Amérique tropicale et dont les fruits se consomment après cuisson, soit à complet développement, soit à l'état jeune (courgette). Leur plus ancienne présence dans l'alimentation humaine est décelée 7000ans avant notre ère au Mexique (CHAUX et FOURY, 1994 ; RENAUD, 2003). Introduite en Europe au 16^{ème} siècle où les Italiens ont été les premiers à l'adopter.

La courgette a été domestiquée de par son excellente tenue au transport et sa qualité antiscorbutique, utilisée comme vivres de bords par les navigateurs, après la découverte du nouveau monde, ce qui facilita sa dissémination sur tous les continents.

Les travaux récents ont considérablement amélioré les performances des types les plus cultivés de courge notamment par la création d'hybrides F1 (ERARD, 2002).

Les fruits, de formes très variées, sont utilisés, pour l'alimentation humaine (potiron ; courgette, etc..) ou animale (citrouille); certaines variétés, sont employées pour la décoration (coloquintes, gourdes) (CLEMENT ,1981).

2-1-2-Situation économique

La production au sein de la CEE est de 640 mille tonne, dont 350 mille .t sont produites par l'Italie (54%), suivie de l'Espagne (24%), la France (16%) et la Grèce (6%) (CHAUX et FOURY, 1994).

Aujourd'hui, les courges et les citrouilles sont cultivées principalement en chine, Roumanie, Egypte, Argentine, Turquie, Italie et au Japon (Encyclopédie de la cuisine, 1999)

La production française a atteint un volume de l'ordre de 162 mille tonnes en 2000 (dont 25 mille tonnes pour la transformation). La courgette étant présente toute l'année, bénéficie d'une image positive d'aliment diététique (ERARD, 2002).

La production au niveau de la wilaya de MILA est de 29140 quintaux pour une surface de 228 ha en 2003-2004 et de 23 742,5 quintaux en 2004-2005 pour une surface de 278,55 ha (Direction de l'agriculture de MILA).

2-2-Morphologie et développement de la plante

2-2-1-Phases de développement

La levée, a lieu, quand la température du sol est supérieure à 20°C, les courges demandent de la chaleur, beaucoup d'eau et un sol riche en matières organiques, elles sont sensibles au gel (CLEMENT ,1981).

La courgette est une plante annuelle, à végétation ramassée et à croissance indéterminée, son développement dépend du type de sol où elle est cultivée (ERARD, 2002).

Chez la courgette (courge d'Italie), les conditions de formation des fruits sont réunies (environ 60 jours après semis) (CHAUX et FOURY, 1994).

La tige principale de la courgette possède des bourgeons secondaires atrophiés, avec des entrenoeuds courts d'où partent feuilles et fruits (ERARD, 2002).

2-2-2-Morphologie au moment de la récolte

Le fruit est une baie charnue, uniloculaire, sans cavité centrale, cylindrique, parfois en massue, généralement de couleur verte. Les fruits naissent à partir des axillaires foliaires, attachés par un pédoncule épais et court. Ils sont récoltés avant maturité complète avant qu'ils durcissent. En conditions printanières précoces, les premiers fruits sont récoltés entre 70 et 85 jours après le semis. De couleur, uniforme ou rayée, tachetée, son intensité est un facteur variétal. (ERARD, 2002).

2-2-3- Classification

La courge d'Italie (figure 2-1) est le type le plus cultivé pour ses fruits de croissance extrêmement rapide, cueillies (avant maturité), de 2 à 7 jours après la floraison (Encyclopédie de la cuisine, 1999), consommé à l'état jeune- soit au quart (1/4) ou au tiers (1/3) de leur développement définitif- sous le nom de courgette, ils ont alors 7 à 30 cm de long, selon la variété et le stade de cueillette (CHAUX et FOURY, 1994). Leur peau est tendre et comestible tout comme leurs graines. Elles sont fragiles et se conservent peu de temps (Encyclopédie de la cuisine, 1999).

La figure 2 montre les différentes formes de fruits de *Cucurbita pepo* L.

2-3-la plante

Les variétés *Cucurbita pepo*, utilisées pour la production de la courgette sont le plus souvent des hybrides F1.

Les variétés de courgette appartenant au type « courge d'Italie » sont à fructification précoce et de développement très rapide. Les fruits récoltés jeunes, ont entre 17 à 30 cm de long, ils sont droits, de section légèrement polyédrique.

L'épiderme est lisse, plus ou moins brillant, tendre (risque de blessures), de couleur vert clair, vert moyen, vert foncé ou très foncé, diversement strié de macules claires (CHAUX et FOURY, 1994).

2-4-Facteurs de l'environnement

La courgette exige un climat tempéré à chaud (RENAUD, 2003); température optimale entre 16 et 25°C (sol : 18-25°C) (CHAUX et FOURY, 1994), selon la luminosité (ERARD, 2002).

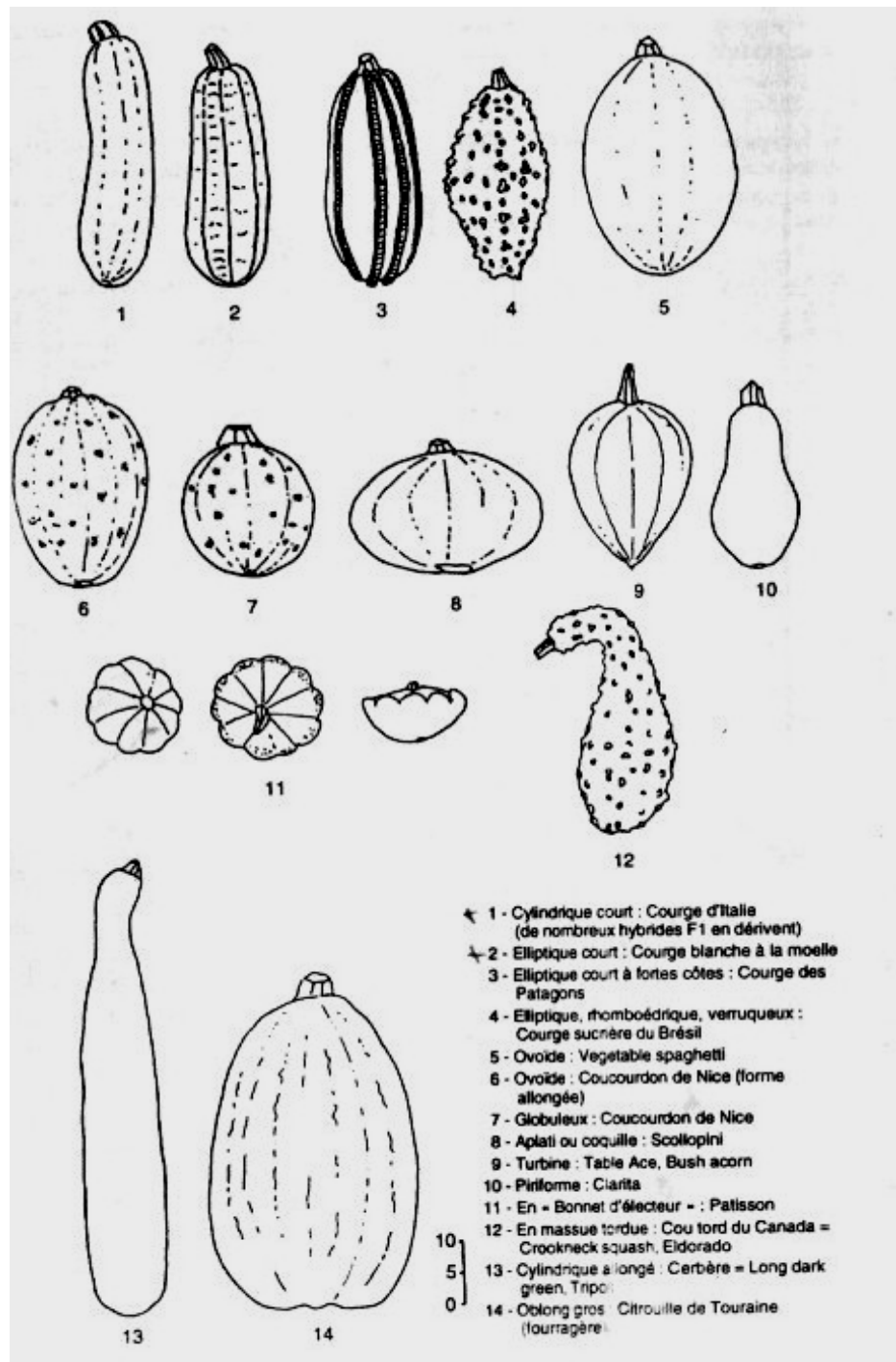


Figure 2 : Quelques formes de fruits de *Cucurbita pepo* L (CHAUX et FOURY, 1994)

Elle est sensible aux températures froides ; la température létale se situe à -1°C (ERARD, 2002), toute gelée, même brève détruit la plante (CHAUX et FOURY, 1994).

La courgette acquiert un développement optimal quand la différence de température entre le jour et la nuit n'excède pas 6°C . Aux alentours de 15°C , La croissance et le développement sont accélérés, entre 15 et 20°C , les fruits grossissent plus vite (ERARD, 2002).

La courgette est peu exigeante à la nature du sol, préfère les sols légers, frais et riche en humus ayant une bonne capacité de rétention d'eau, meuble, fertile, convenablement drainant et un pH entre 5.5 et 6.8 (CHAUX et FOURY, 1994 ; ERARD, 2002 ; RENAUD, 2003)

§ Hygrométrie de l'air et humidité du sol

La croissance rapide, le développement végétatif important ainsi que la production des fruits -qui contiennent 95 % d'eau- entraîne des besoins élevés en eau (ERARD, 2002) et éléments minéraux. L'humidité ambiante, a une influence sur la respiration, de par ses origines à climat chaud et humide, la courgette a besoin d'humidité, d'une façon raisonnable. Les besoins en eau d'une culture de plein air sont de l'ordre de 4000m³ /ha (CHAUX et FOURY, 1994). Les besoins en eau varient du simple au double, du début de la floraison et jusqu'au début de récolte (ERARD, 2002).

§ La luminosité ou intensité lumineuse

Elle dépend de l'insolation, une faible intensité lumineuse se traduit par une moindre activité photosynthétique pour la plante. La lumière intervient sur la maturation des fruits et sur leur précocité (ERARD, 2002).

§ Rôle des éléments nutritifs

L'azote est essentiel au bon développement des plantes et reste l'élément clef du rendement ; Le phosphore est un facteur favorable à la floraison et fructification .Il améliorerait la qualité de la production, selon MARMOL (1997) cité par ERARD (2002). Le potassium est aussi un élément intéressant pour la qualité (ERARD, 2002).

Les principaux cycles culturels de la courgette en culture sous abri sont hiverno-printaniers, dont le semis se fait à partir de février –mars avec une récolte en avril, mai et juin. La plantation se fait en début de février (le 10), l'apparition des fleurs femelles en 40 jours et fleurs mâle en 50 jours et la récolte se fait à partir du 20 avril, soit 70 jours, se terminant selon le niveau de cours plus ou moins tôt en mai.

2-5-Récolte, conservation, conditionnement

La courgette, doit être récoltée très jeune. Les fruits, de 18-22cm de longueur, pèsent entre 150 à 200 g ; ils sont encore étroits, bien cylindriques, voire légèrement anguleux et restent fermes à la cuisson. La cueillette doit être assurée quotidiennement, au plus tous les 2 jours.

Les récoltes au stade précoce favorisent une production prolongée en réduisant les concurrences entre sites de croissance.

On sectionne le pédoncule à 1 cm du fruit. L'épiderme étant fragile, les courgettes doivent être manipulées avec soin et le moins possible (CHAUX et FOURY, 1994).

La conservation se fait pendant quelques jours au frais et à l'abri de la lumière du jour (RENAUD, 2003).

La courgette se caractérise par un niveau de respiration modérée, une faible émission d'éthylène, une durée de survie potentielle selon les conditions ; d'une semaine (entre 10 et 20 °C, 60 % d'HR) et deux semaines (à 7 °C, 95 % HR). Les températures de 5 à 10 °C et humidité : 90-95 % (ERARD, 2002), avec une bonne aération sont recommandés pour une bonne conservation. (Encyclopédie de la cuisine, 1999).

Les courgettes supportent mal les délais de distributions. Passé 4 à 5 jours, les fruits perdent de leur fermeté et de leur brillant (CHAUX et FOURY, 1994).

2-6- Composition et évolution de la composition biochimique

L'une des raisons pour laquelle la consommation de la courgette a presque doublée en 10 ans est son intérêt nutritionnel et diététique. En effet, ce légume est caractérisé par :

- un apport énergétique faible lié à ; sa richesse en eau et sa teneur faible en éléments énergétiques (glucose et fructose sont les principaux glucides, disaccharides et polysaccharides sont présents en très petites quantités).

- une composition en fibres qui augmente au cours de la maturation : protopectines et pectines au stade jeune, cellulose et hémicellulose au stade plus avancé ;

- une bonne densité minérale : potassium, phosphore, calcium et magnésium, notamment ;

- un apport diversifié et modéré en vitamines. Une teneur appréciable en acide folique très supérieure à celle de nombreux légumes frais (ERARD, 2002)

Les courgettes sont une excellente source de vitamine A ; elles contiennent de la vitamine C, de l'acide pantothénique et du cuivre (Encyclopédie de la cuisine, 1999)

La courgette s'avère un légume de choix pour un régime hypocalorique et hyposodé (sans sel), intéressante pour les malades cardiovasculaires par sa richesse en potassium, et elle présente une excellente digestibilité (ERARD, 2002).

Tableau 4 : Composition chimique de la courgette (zucchini) crue

Composants (g)			Minéraux (mg)			Vitamines (mg)		
	1	2		1	2		1	2
Eau	94	92,2	Na	3	3,00	C	20	17,07
Protéines	1,8	1,6	Mg	18		Niacine	0,56	
Glucides disponibles	2	2,05	P	31	23	B6	0,11	119(µg)
Glucides disponibles -sucres -fructose -glucose -Amidon	2	-	K	230	152	Folates (µg)	50	
	1,9	-	Ca	19	30	Equivalent rétinol (µg)	-	31,42
	-	1,02	Fe	0,4	1,50	Caroténoïdes totaux (µg)	-	197
	-	0,903						
0,1	-	Energie STD (kcal)	17	18,2	α-carotène (µg)	-	17	
Fibres	1	1,08	Proportion comestible	0,85	-	β-Carotène (µg)	-	180
Lipides	0,2	0,6						

1: FAVIER et coll., 1995 ; 2: SOUCI et coll., 1994

3- Carde (cardon)

C'est une plante vivace, pérenne : 10 à 15 ans, (Anonyme, 1998) appelé aussi chardonnette (RENAUD, 2003). Le cardon appartenant à la famille des Astéracées (Compositae) (CLEMENT ,1981 ; CHAUX et FOURY ,1994), ressemble à l'artichaut, dont on consomme les côtes, larges et charnues et cuites (CLEMENT ,1981; RENAUD, 2003);

L'espèce est *Cynara cardunculus (L)* (CHAUX et FOURY ,1994 ; Anonyme, 1998 ; RENAUD, 2003).

Les graines de cardon (*Cynara cardunculus*) se sèment à la mi-mai à l'automne, avant la récolte on fait blanchir les pieds en liant les feuilles et en les buttant jusqu'à 25 cm .Les pieds sont ensuite entourés de paille ou de vieux tissus et arrachés trois semaines plus tard environ. Un pied pèse de 1,5 à 1,7 kg. (CLEMENT ,1981).

3-1-Origine et présentation générale

3-1-1-Physionomie de la production

Le cardon est considéré comme un légume d'importance secondaire, il se distingue par :

- la partie consommée ; « côtes » (pétiotes et nervures centrales) et un capitule, et;
- le mode de multiplication, par semis (en général) et non par bouturage.

Il est probablement plus ancien que l'artichaut, mais il est resté cantonné aux pays circum-méditerranéens (CHAUX et FOURY, 1994 ; Anonyme, 1998) ; Europe méridionale et Afrique du nord (RENAUD, 2003).

D'une teneur en eau de 90 à 94%, la partie comestible a une valeur énergétique calorifique faibles (20 cal/100g de M.F.).Elle est riche en calcium, potassium et sodium ;

D'une saveur agréable, le cardon entre dans des préparations culinaires traditionnelles de pays méridionaux : couscous, « gros soupa de Provence » des repas de Noël, et dans différentes spécialités lyonnaises (CHAUX et FOURY ,1994).

3-1-2-Situation économique

Selon CHAUX et FOURY (1994), les statistiques sont pratiquement inexistantes ; l'Italie produirait environ 18000 tonnes sur 80 hectares (20 tonne /ha), la production Espagnole serait du même ordre de grandeur.

3-2-La plante

3-2-1-Caractères botaniques

L'ensemble de la touffe du cardon peut atteindre 1m à 1,5m de hauteur (CHAUX et FOURY ,1994) et 2 à 2,5 m selon ITCF (1998).

Le pétiole et la nervure médiane constituent une « côte » ou « carde » très développée et de section sensiblement triangulaire ; enracinement pivotant, le groupement d'inflorescences est ramifié. Il porte 30 à 40 capitules assez petits, coriaces mais inermes (CHAUX et FOURY ,1994).

3-2-2-Variétés

Il existe 5 à 6 appellations variétales regroupées en deux groupes :

*Type Puvis ou Blanc amélioré, à feuilles larges et peu découpées, vert foncé, dont les cotes larges, demi pleines, complètement inermes, ont tendance à blanchir naturellement.

*Type Plein inerme, à grande rosette dressée (1,20 à 1,30 m),feuilles découpées,côtes très épaisses et pleines,garnies de faibles épines ou,dans certaines sélections complètement inermes,blanchiment après « attachage »,présente une bonne aptitude à la conservation en cave (CHAUX et FOURY ,1994).



Figure 3: photo de côtes et feuilles de cardon (Site WIKIPEDIA, 2006)

3-3-Facteurs d'environnement

Le cardon exige un climat tempéré et un sol riche en humus (RENAUD, 2003). Lorsqu'il est ligaturé supporte bien les petites gelées d'automne, mais il est plus ou moins gravement endommagé, au dessous de -2 à -3 °C, surtout par gelées persistantes.

Pour atteindre tout son développement dans les 5 à 7 mois de sa culture, il demande des terres riches et profondes (CHAUX et FOURY ,1994).

3-4-Production

Le cardon est produit en plein champ, à partir d'une plantation ou d'un semi en place, la culture n'est mise en place avant le mois de mai (effets inducteurs des températures < 12°C). La récolte ou l'arrachage ont lieu d'octobre à novembre, avant les premières gelées hivernales sérieuses.

L'obtention du plant et semi en avril, sous température de 18-20 °C. Leur mise en place, se fait au delà du 10 mai. Pour obtenir des côtes charnues, tendres et non amères, il est indispensable que les cultures soient maintenues constamment en état de fraîcheur. Durant le cycle cultural, pouvant s'étendre sur 6 à 8 mois, quatre apports d'eau sont de l'ordre de 3500 m³ / ha (CHAUX et FOURY ,1994).

3-5-Récolte, conservation, conditionnement

3-5-1-Blanchiment

30 à 40 jours avant la récolte, la touffe est resserrée et liée (« attachage ») puis entourée de paille, d'un papier fort ou d'un film plastique noir (retenu par une ligature légère) ; ce qui provoque l'étiollement des côtes (CHAUX et FOURY, 1994).

3-5-2-Récolte

Le cardon est vendu « au pied ». A la récolte, les feuilles du tour sont éliminées et les autres, tranchées au 2/3 ou au 3/4 de leur longueur (CHAUX et FOURY, 1994). Il est récolté 5 mois après les semis pour les côtes et à consommer rapidement (RENAUD, 2003).

3-6-Composition du Cardon cru

Selon ITCF (Anonyme, 1998) ; les fibres sont principalement localisées dans les tiges avec une structure bien différenciée entre moelle (pauvre en fibres) et les structures corticales (riches en fibres). Le tableau 5 indique la composition du cardon.

Tableau 5 : Composition du cardon cru ; (FAVIER et coll., 1995)

Composants (g)		Minéraux (mg)		Vitamines (mg)	
Eau	92.7	Na	23	Equ. β - Carotène (μ g)	Traces
Protéines	0.8	Mg	32	C	4
Glucides disponibles	2.2	P	23	Niacine	0.3
-sucres	1.9				
-Amidon	0.3				
Fibres	2	K	400	B6	0.05
Lipides	0.1	Ca	70	Folates (μ g)	34
Energie STD (kcal)	13	Fe	0.7	Proportion comestible	0.6

4-Pomme de terre

La pomme de terre est une plante herbacée, de la famille des Solanacées (CLEMENT, 1981 ; RENAUD, 2003).

Elle est cultivée essentiellement, pour ses tubercules souterrains, charnus, jaunes, roses, rouges, violets ou presque noirs ; de formes différentes ; sphériques, longs, ovales, aplatis, en rognon (RENAUD, 2003). Les tubercules sont très riches en amidon, principalement utilisés en alimentation humaine, mais aussi en alimentation animale (CLEMENT, 1981).

4-1- Origine et présentation générale

4-1-1-Physionomie de la production

La pomme de terre est originaire de la cordillère des Andes : de la Colombie au Chili (RENAUD, 2003). Elle est cultivée il y a 7000 ans, domestiquée au sud du Pérou et du nord de la Bolivie. Découverte au moment de la conquête du nouveau monde, vers 1570 (ELLISSECHE, 1999).

4-1-2-Situation économique

La pomme de terre est la 4^{ème} production alimentaire végétale au niveau mondiale après les céréales, cultivée sur environ 20 millions d'hectares avec une production de 300 millions de tonnes. Les surfaces cultivées sont en augmentation en Afrique, en Amérique latine et en Asie du sud est (ELLISSECHE, 1999).

La production mondiale de la Pomme de terre en 2003 s'est élevée à 311, 4 millions de tonnes, pour 192000 km² plantés, soit un rendement moyen de 1480 tonne /km².(FAO, 2003). Les principaux producteurs pour l'année 2003 sont indiqués dans le tableau 6.

Tableau 6 : Principaux producteurs mondiaux de la pomme de terre en 2003 ((FAO, 2003) :

pays	production en millions tonnes
Chine	66.8
Union Européenne (à 15)	43.3
Russie	35.9
Inde	24.0
Etats-Unis	20.8
Ukraine	17.6
Pologne	13.5

La production nationale de la pomme de terre en Algérie en 2002 est de 1 million de tonne (Anonyme, 2006). La quantité importée est de 175107 tonnes pour la même année (source données FAO STAT année 2004), elle est classée en 12^{ème} rang des pays importateurs de pomme de terre.

Dans la wilaya de MILA elle est estimée à 471 060 quintaux pour une surface cultivée de 1783,5 hectare pour l'année 2004-2005, et à 421 920 quintaux pour 1740,5 hectare pour l'année 2005-2006 (Direction de l'agriculture de la wilaya de MILA) .

4-2- La plante

- Caractères botaniques

La famille des solanacées comprend plusieurs espèces à tubercule, dont fait partie la pomme de terre (*Solanum tuberosum*) (CLEMENT ,1981 ; ELLISSECHE, 1999).

Le tubercule de pomme de terre est l'extrémité tubérisée d'une tige souterraine. Il porte des bourgeons dormants situés au fond d'une dépression, ou œil, disposés de façon alternée sur une spirale. Les yeux rassemblés autour du bourgeon terminal forment la couronne. Après un temps de repos végétatif plus ou moins long, les bourgeons entrent en croissance et le tubercule germe (CLEMENT ,1981).

-Cycle biologique

La durée du cycle végétatif de la pomme de terre dure entre 90 à 150 jours (ELLISSECHE, 1999), le cycle de développement comprend 3 phases principales. À partir de la récolte du tubercule : le repos végétatif du tubercule, la croissance des germes, la croissance et la tubérisation de la plante. Ces phases se réalisent même en l'absence de toute plantation (CLEMENT ,1981).

Le grossissement des tubercules s'effectue d'abord par multiplication cellulaire puis les cellules augmentent de volume par accumulation d'eau et de grains d'amidon (ELLISSECHE, 1999). Il dépend du climat (température, photopériode ou durée du jour), du tubercule mère et du feuillage (CLEMENT ,1981 ; ELLISSECHE, 1999).

La pomme de terre a une réaction de « jour court » pour la tubérisation, les variétés ne diffèrent entre elles que par la photopériode critique au dessus de laquelle la tubérisation est inhibée (CLEMENT ,1981)

4-3-Facteurs de l'environnement

-Climat: La pomme de terre est une plante à climat tempéré, qui craint le gel (RENAUD, 2003). Pour la production de pomme de terre primeur, on peut soit planter tôt des variétés peu sensibles aux jours courts et aux températures basses, soit planter tard des variétés à tubérisation rapide. Le zéro de végétation de la pomme de terre est assez élevé (16-18°C) (CLEMENT ,1981).

-Sol : Elle préfère un sol meuble, léger, profond, frais, riche en humus (CLEMENT ,1981 ; ELLISSECHE, 1999 ; RENAUD, 2003), elle tolère des pH assez bas entre 5 et 6, 5 (CLEMENT ,1981 ; ELLISSECHE, 1999).

-Alimentation hydrique: Les exigences hydriques de la pomme de terre sont élevées et constantes durant toute la végétation. Elle s'accommode à toutes les terres, à condition que celles-ci soient suffisamment alimentées en eau (CLEMENT ,1981). Les besoins varient au cours du cycle végétatif avec un maximum au cours de l'initiation des tubercules (ELLISSECHE, 1999).

4-4-Production

- Facteurs pouvant influencer la qualité

Les tubercules peuvent être caractérisés par la couleur de leur peau et de leur chair, leur forme et le degré de l'enfoncement de leurs yeux. La forme est le plus souvent oblongue, plus ou moins allongée mais parfois arrondie (ELLISSECHE, 1999).

Sur le plan commercial, les critères de choix sont :

- Les caractéristiques morphologiques, comme la coloration de la chair, et la présentation du tubercule (forme régulière, aptitude à l'épluchage mécanique) ;

-La qualité de la chair, caractérisée par la finesse de celle-ci (dimension des cellules), sa tenue à la cuisson, sa teneur en féculs (amidon).

Suivant ces différents critères ; on distingue les variétés à chair ferme, fines et de bonne qualité gustative, à très bonne tenue à la cuisson (CLEMENT ,1981).

4-5-Récolte, conservation, conditionnement

Le temps entre l'installation et la récolte ; 2 à3 mois après plantation pour les hâtives ,4 à 5 mois pour les variétés tardives destinées à la conservation hivernale (RENAUD, 2003),

-Récolte

Les tubercules de grande consommation ne doivent être arrachés qu'à maturité complète (fanés desséchés, peau subérifiée), sinon ils se conservent mal. Les variétés hâtives peuvent être récoltées à la mi-juillet, et les plus tardives à la fin de septembre ou au début d'octobre (CLEMENT ,1981). Celles destinés à la conservation se ramassent à maturité, lorsque les tiges sont séchées (RENAUD, 2003).

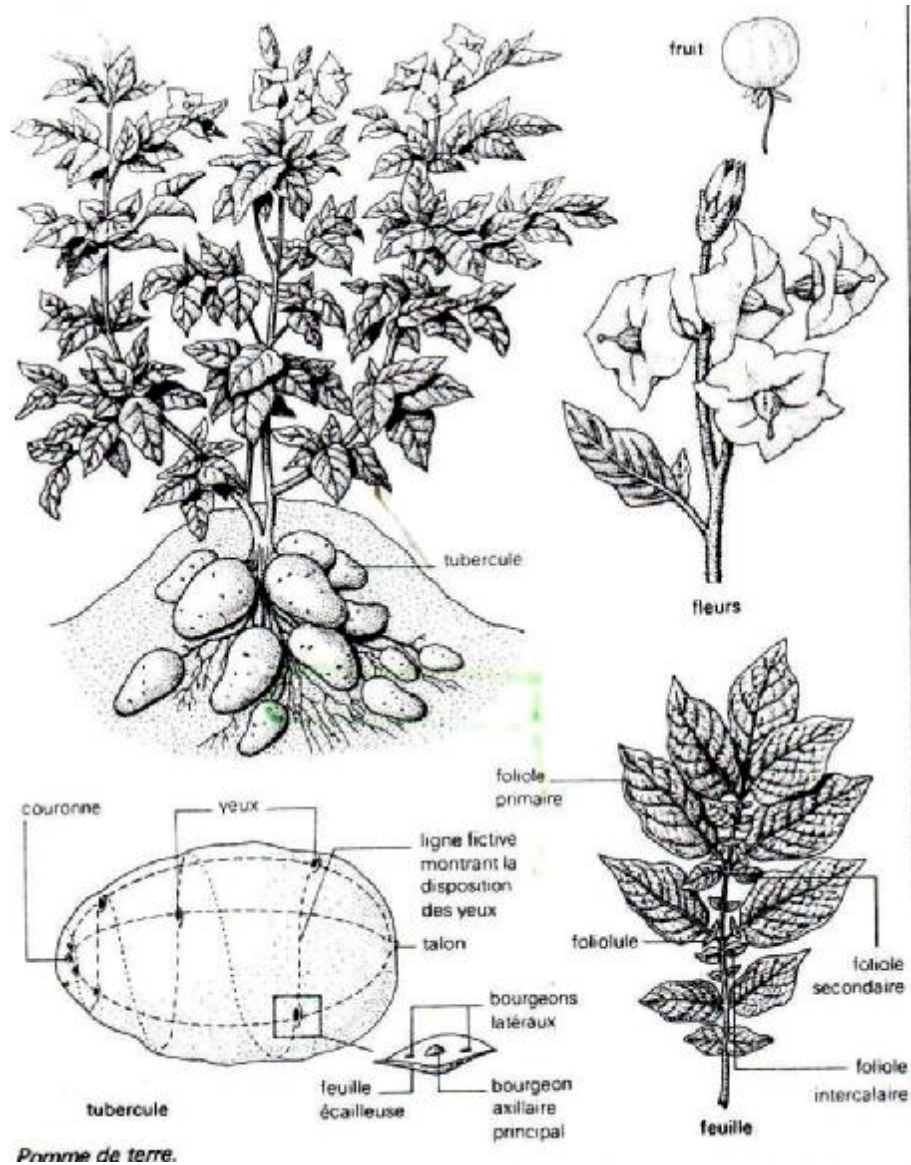


Figure 4 : Différentes parties de la plante de pomme de terre (CLEMENT ,1981)

- Conservation

Le stockage de la récolte devra se faire, si possible, au dessous de 6°C. Par ailleurs le tubercule gèle à -1 et -2°C (CLEMENT ,1981). En cave ou en silo à l'abri de la lumière du jour, au sec et au frais (RENAUD, 2003).

-Traitement industriel et utilisation

Le tubercule de pomme de terre est un aliment énergétique par sa teneur élevée en amidon (de l'ordre de 20%), (ELLISSECHE, 1999)

Les pomme de terre sont consommées en alimentation humaine soit en l'état, après cuisson, soit après une préparation industrielle de produits frites (chips, pomme paille, pommes dauphines congelés ,frites surgelés), déshydratés (purée déshydratée ,poudre, flocons) et

appertisés (conserves). Elles apportent pour 100gramme ; 76 kcal ; 17,7 g de glucides ; 2,1 g de protéines ; 400 mg de potassium.

Une tendance de plus en plus accrue, à acheter la pomme de terre sous une autre forme que le tubercule brut : chips, pomme de terre épluchée, déshydratée ou appertisée, frites surgelées, etc.) (CLEMENT ,1981).

4-6-Composition chimique de la pomme de terre

Les composants majeurs de la pomme de terre sont rassemblés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Composition chimique de la pomme de terre épluchée crue

Constituant (g)	Minéraux (mg)		Vitamines (mg)		
	1	2	1	2	
Eau	79	77,80	EqRétinol(ng)	-	873,00
Protéines	2,1	2,04	Caroténoïdes(μ)	-	5,24
Glucides disponibles	16,6	14,81	Eq β Carotène (μg)	Traces	5,24
-Amidon	14,3	-	C (mg)	10	17,00
Fibres totales	1,6	2,07	Niacine	1	-
Lipides	0,2	0,11	B6	0,26	307 (μg)
Energie STD (kcal)	72	70,22	Folates (μg)	20	20,00
Proportion comestible /Déchets(%)	80	20			

1:FAVIER et coll. (1995) ; 2: SOUCI et coll. (1994)

5- Ail

Plante bulbeuse vivace, l'ail appartient à la famille des liliacées, cultivée pour ses caïeux appelés gousses, qui sont utilisés comme condiment (CLEMENT, 1981), et à l'espèce *Allium sativum* L. (CHAUX et FOURY ,1994).

L'ail (*Allium sativum*) a des feuilles plates, longues et étroites, la tête d'ail est un bulbe constitué par des caïeux, fixés sur un plateau d'où partent les racines. L'ensemble des caïeux est enveloppé dans une fine pellicule blanche ou rose. Le nombre de caïeux par bulbe varie de 5 à 16 (CLEMENT, 1981).

5-1- Origine et présentation générale

5-1-1- Physionomie de la production

L'ail est originaire d'Asie centrale (CHAUX et FOURY ,1994 ; RENAUD, 2003); les formes actuelles étant vraisemblablement issus de la Chine et le bassin méditerranéen.

La déshydratation est le plus gros utilisateur industriel d'ails. La salaison et l'industrie pharmaceutique n'en utilisent que des quantités relativement faibles (CLEMENT ,1981) ; 5% de la masse commercialisée (CHAUX et FOURY ,1994).

Au total, le débouché industriel est de l'ordre de 3500 à 4000 tonnes (CLEMENT ,1981).

5-1-2-Situation économique

Dans le monde, l'ail est cultivé sur environ 380000 ha, dans les deux hémisphères. Il occupe le 14^{ème} rang parmi les 15 espèces légumières les plus cultivées dans le monde, avec une production assez stable de 2,7 millions de tonnes. L'essentiel de la production mondiale 80% sont très dispersées mais se limitent aux zones bénéficiant d'un climat méditerranéen (CHAUX et FOURY ,1994).

La production mondiale en tonnes de 2003 et 2004 est présentée dans le tableau n° 8.

Tableau 8 : Production mondiale de l'ail en tonne de 2003 et 2004

Pays	2003		2004	
	tonnes	%	tonnes	%
Chine	10 080 049	74%	10578000	75%
Inde	500 000	3,6%	500000	4%
Corée du sud	391 182	2,9%	378846	3%
Etats unis	283 090	2%	283090	2%
Russie	218 830	1,6%	220000	2%
Egypte	216 000	1,6%	216000	2%
Espagne	188 900	1,4%	157600	1%
Autres pays	1 818 260	13,2%	1612011	11%
Total	13 696 311	100%	14045047	100%

Source : Données FAOSTAT, année 2004. (Microsoft ® Encarta ® 2007. © 1993-2006 Microsoft Corporation).

La production au niveau de la wilaya de MILA est de 4655 quintaux en 2003-2004 pour une surface de 202 ha et de 4142,5 quintaux en 2004-2005 pour une surface de 287 ha (Direction de l'agriculture de la wilaya de MILA).

5-2-La plante

5-2-1-Caractères botaniques

- Morphologie : L'ail est une plante bulbeuse, les feuilles sont cylindriques et fines à la base ; devenant scarieuses, elles constitueront, lors de la tubérisation des caïeux ; la tunique du bulbe.

- Cycle de l'ail : L'ail requiert un repos végétatif plus ou moins marqué ; quatre phases du cycle biologique,

Le bulbe récolté à maturité, alors que les feuilles sont partiellement sèches, est à l'état dormant .Il est donc incapable de « germer » même en conditions favorables, pendant une période dont la durée dépend des température de conservation et de la variété.

Dans les 85 à 190 jours qui suivent la levée de dormance, le caïeu (unité de multiplication) mis en terre s'enracine et germe aux dépens de ses réserves.

(CHAUX et FOURY ,1994).

La tubérisation des bourgeons axillaires en caïeux, la formation et le grossissement des bulbes sont induites et favorisés par des températures élevées >20 °C et des jours longs (CLEMENT ,1981 ; CHAUX et FOURY ,1994).

5-2-2- Classification

Il est d'usage de classer l'ail, selon la couleur des téguments, en ail rose et ail blanc. Mais le critère de couleur informe moins que celui de l'intensité de dormance naturelle, dont dépendent l'époque de plantation et l'aptitude à la conservation (CHAUX et FOURY ,1994).

Les critères de classification sont:

*Couleur de la tunique externe : Blanche ; Striée de violet (*Violet de Cadours*) et Jaune cuivrée

*Couleur de caïeux : Rougeâtre ; Mauve (*Violet de Cadours*) et Rosé.

5-3-Facteurs de l'environnement

Les exigences climatiques de l'ail sont relativement modestes, il peut supporter des températures très basses de l'ordre de – 15 à -18 °C. L'évolution de la dormance s'effectue par sa levée à des températures fraîches de 7 °C, (CLEMENT ,1981; CHAUX et FOURY ,1994). La tubérisation est induite par les températures élevées ; 18-20 °C (proches de celles maintenant la dormance) et les jours longs (CLEMENT ,1981; CHAUX et FOURY ,1994).

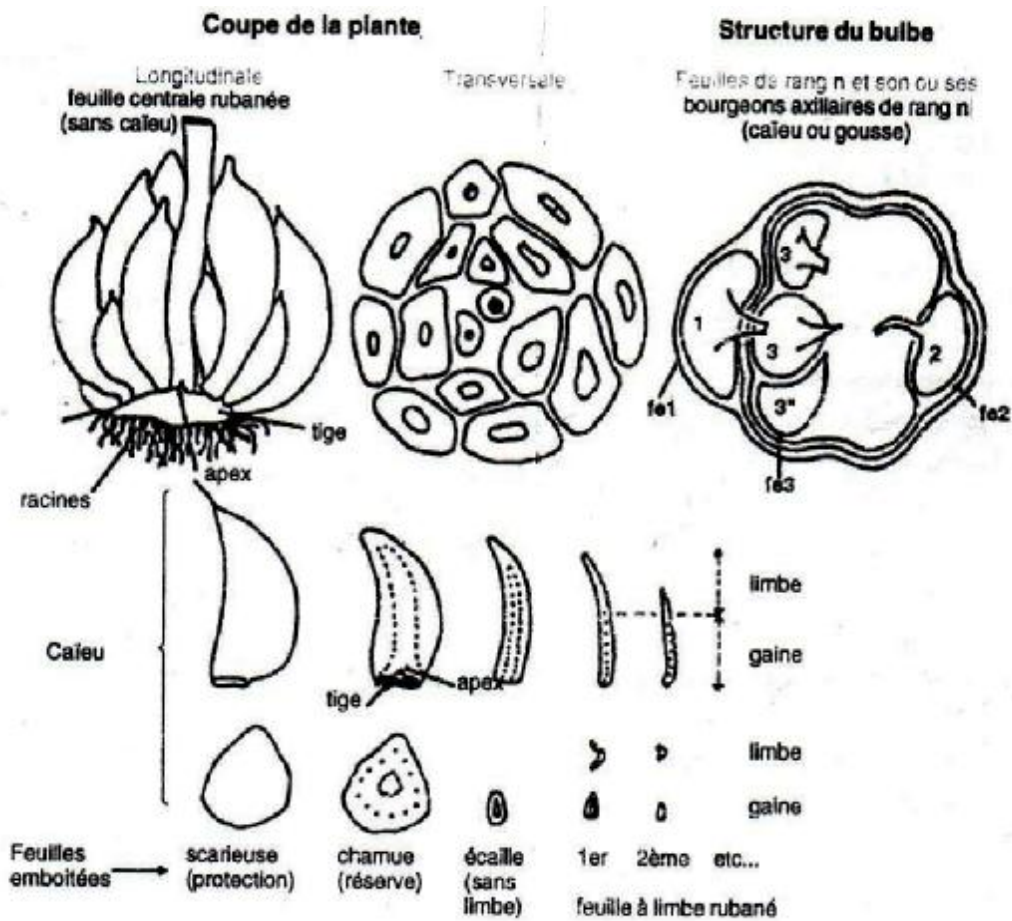


Figure 5 : Différentes vues et coupes de la structure de l'ail (CHAUX et FOURY ,1994).

-Sol, nutrition minérale et alimentation hydrique

L'ail est peu exigeant au regard des sols. Le sol doit être meuble, se réchauffe facilement et perméable (CLEMENT ,1981 ; CHAUX et FOURY ,1994), profond, léger et pas trop humide (RENAUD, 2003) . L'ail est modérément tolérant aux pH acides et ne doit pas être cultivé au dessous de pH5, 5, éviter les sols trop calcaires. (CHAUX et FOURY ,1994).

.A noter une forte consommation en soufre, composant les sulfures d'allyles qui confèrent à l'ail sa saveur originale.

La consommation en eau faible en début de croissance (mars- avril) s'élève en pleine phase de grossissement du bulbe, puis diminue dans la phase précédant la récolte (CHAUX et FOURY ,1994).

5-4-La production

Les cycles culturaux de l'ail sont sous la double dépendance du climat et de la variété.

-les variétés d'automne sont plantées avant décembre et récoltées en fin juin -début juillet (entre 7 à 8 mois)

-Les variétés de printemps ou alternées sont plantées ; en février-mars, pour une récolte de mi-juillet à début août ; et en fin janvier –début février pour une récolte dans le courant de juillet (CLEMENT ,1981; CHAUX et FOURY ,1994).

5-5-Récolte, conservation, conditionnement, utilisation

- Récolte

L'ail est considéré comme « mûr » lorsque le tiers supérieur des feuilles est jaune ou sec (CHAUX et FOURY, 1994 ; RENAUD, 2003);

La récolte a lieu en juin -juillet, des rendements de 8 à12 t/ha et 6 à7 tonnes/hectare sont possible selon les variétés. Mais les rendements moyens sont souvent inférieurs de 30 à 40% de ces chiffres (CLEMENT ,1981).

- Conservation

L'ail doit être obligatoirement séché, d'abord au champ, pendant quelques jours puis sous hangar ou en grenier ; soit au sol, soit -pour l'ail en botte- sur fil de fer ou en cellules. (CHAUX et FOURY, 1994).

La conservation a lieu dans un local bien aéré et sec ; au froid (de -0,5 à 1 °C) ou au chaud (plus de 18 °C) pour empêcher toute germination. (CLEMENT ,1981).

- Présentation à la vente

Trois présentations traditionnelles sont réglementées:

-Vrac : bulbes libres dont la « tige » ne doit pas dépasser 10 cm en frais, 3cm en sec ;

-En bottes : au moins « 6 têtes » en frais et demi-sec, 12 en sec les tiges de 25 cm.

-En nattes ou en guirlandes : de 12 à 24 têtes, les feuilles étant tressées (CHAUX et FOURY, 1994)

- Utilisation

L'ail est une plante condimentaire majeure de la cuisine méditerranéenne, en gousse ou écrasé, cuit ou cru, il relève sauces, viandes et autres plats.

Les vertus thérapeutiques de l'ail cru, pendant longtemps mises à profit, sont aujourd'hui vérifiées scientifiquement. Grâce à ses composés organosulfures, il contribue à la bonne santé cardiovasculaire en fluidifiant le sang et en diminuant la tension artérielle ainsi que le taux de cholestérol sanguin. C'est aussi un antiseptique, un vermifuge et un antispasmodique (Microsoft® Encarta® 2007).

5-6-Composition chimique de l'ail

Les composants essentiels de l'ail frais sont présentés dans le tableau 9.

Tableau 9 : Composition chimique de l'ail frais en g/ 100g.

Composants (g)			Minéraux (mg)			Vitamines (mg)		
	1	2	1	2		1	2	
Eau	63,7	64	Minéraux	1,42(g)		C	30	14
Protéines	7	6,05	Na	17		B6	1.2	
Glucides disponibles -sucres	24,5	28,41	Mg	21		Folates (µg)	3	
	2,4	-	P	134	136	Proportion comestible/Déchets %	87	12
-Amidon	22,1	-	K	446		Energie STD (kcal)	133	138
Fibres	3		Ca	38	38			
Lipides	0,5	0,12	Fe	1.4	1.40			

1: FAVIER et coll., 1995 2: SOUCI S. et coll., 1994

6- Oignon

L'oignon est une plante bisannuelle, de la famille des liliacées et espèce *Allium cepa L* (CLEMENT ,1981 ; CHAUX et FOURY, 1994), cultivée dans de nombreux pays pour son bulbe, consommé comme légume frais, demi-sec et sec ou comme condiment (oignon confit au vinaigre) (CLEMENT ,1981).

L'oignon (*Allium cepa*) est constitué d'une tige très courte, ou plateau, d'où partent des racines et des feuilles possédant une graine et un limbe. Le bulbe se forme quand les jours sont longs, par épaissement des graines (CLEMENT ,1981). Sa durée de culture est de 3 1/2 mois à 4 mois (CHAUX et FOURY, 1994).

Le bulbe seul utile à l'homme, acquérant un fort volume relatif dès la première année. Cependant, l'espèce est photopériodique pour la bulbification (nécessité de jours longs), thermo périodiques pour la floraison (CHAUX et FOURY, 1994).

6-1- Origine et présentation générale

6-1-1- Origine

Son centre d'origine supposé est en Asie ; Afghanistan, Kirghizistan, Dzoungarie. Très tôt elle passe en Egypte ou les premiers témoignages picturaux dateraient de 3700 av. J-C. La migration vers la Chine et le Japon est sans doute également très ancienne (CHAUX et FOURY, 1994).

6-1-2-Situation économique

La production mondiale de 2004 était de 53 591 283 tonnes. La Chine étant le 1^{er} producteur avec 18 503 500 tonnes, vient l'Inde avec 5 500 000 tonnes en deuxième position, et l'ex URSS avec 3 323 600 tonnes (FAO, 2004).

La production nationale, en Algérie de 2002, de l'oignon est 0,31 million de tonne (ANONYME, 2006). Dans la wilaya de MILA elle a été de 49 932 quintaux en 2004-2005 pour une surface de 362 hectare et de 53 145 quintaux en 2005-2006 pour une surface cultivée de 543 hectare (Direction de l'agriculture de la wilaya de MILA).

La production mondiale de 2003 est présentée dans le tableau 10 des Oignons secs avec les principaux producteurs.

Tableau 10 : Principaux producteurs mondiaux de l'oignon sec en 2003 en tonnes

PAYS	PRODUCTION EN 2003 (tonnes)
Production mondiale	52 546 545
Chine	17 544 660
Inde	5 000 000
États-Unis	3 162 750
Turquie	1 800 000
Russie	1 560 590
Iran	1 500 000
Pakistan	1 400 000

Source : Données FAOSTAT, année 2004 (Microsoft ® Encarta ® 2007. © 1993-2006 Microsoft Corporation. Tous droits réservés).

6-2- La plante

L'état de développement de la plante au moment de la bulbification intervient de manière sensible dans le volume définitif du bulbe.

La partie supérieure des graines ne s'élargit pas, une sorte d'étranglement ou « collet » constituant le sommet du bulbe. De par sa densité et sa forte teneur en eau cette zone est extrêmement sensible à l'attaque des champignons (CHAUX et FOURY, 1994).

Le grossissement du bulbe se poursuit activement durant 6 à 8 semaines puis le collet se ramollit, ses limbes perdent leur turgescence et se couchent (« tombaison ») ;

Les variétés hybrides F1 ont des formes et calibres plus homogènes (CHAUX et FOURY, 1994).

Une série de critères, constituant les bases d'une classification des types variétaux :

*couleur : oignons blancs ou de couleur (jaune, rouge, rose)

*forme : voir figure 6

*époque de semis et de bulbification : (CHAUX et FOURY, 1994),

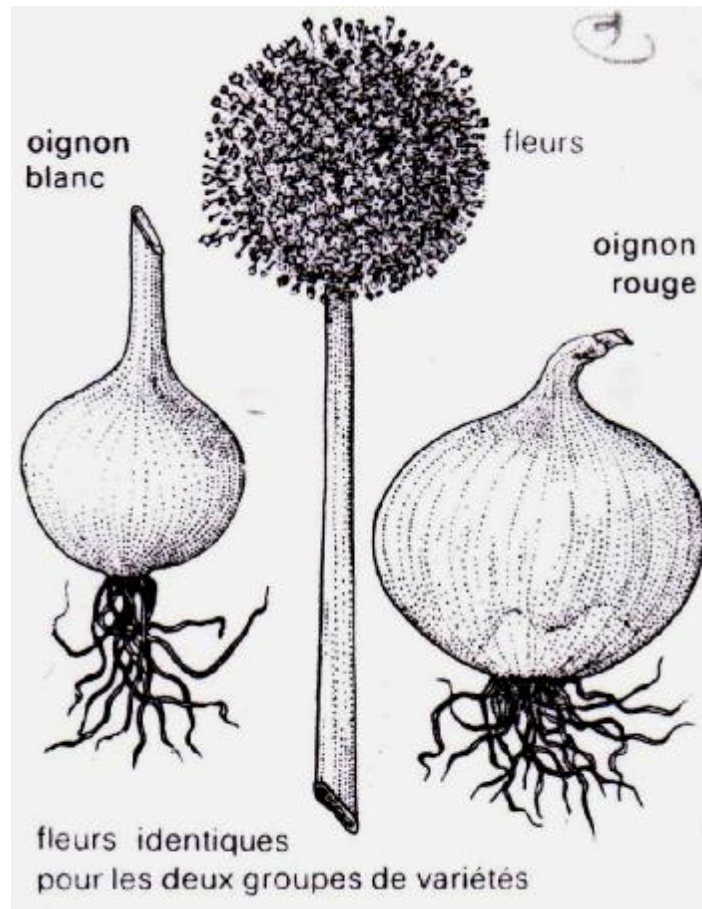


Figure 6: Forme des deux groupes d'oignon (blanc et rouge) (CLEMENT, 1981)

Le groupe des oignons rouges et rosés, est peu commercialisé (CLEMENT ,1981) destiné pour le traitement industriel (déshydratation) (CHAUX et FOURY, 1994) :

La chair des oignons rouges est le plus souvent douce et colorée, certains de cycle long peuvent être utilisés en oignon de garde. Les variétés rouges sont généralement de photopériode intermédiaire. Elles sont de ce fait, cultivées en semi de fin d'été ou de fin d'hiver (CHAUX et FOURY, 1994).

Les caractéristiques et comportement cultural de la variété Bronzé d'Amposta sont gros en forme de globe, couleur de la tunique brun rouge, époque de semi de fin janvier début février, étant considéré comme oignon de garde leur amplitude de conservation est excellente.

6-3-Facteurs de l'environnement

- Climat

Cette plante de climat tempéré (RENAUD, 2003), demande une période de chaleur et de lumière au moment de la tubérisation. C'est aussi à ce moment que ses besoins en eau sont les plus élevés. Une certaine sécheresse est ensuite nécessaire à l'arrêt de la végétation ; elle permet la maturation du bulbe (CLEMENT ,1981).

La bulbification est essentiellement commandée par la longueur du jour ; l'espèce est dite de jour long pour sa tubérisation ; signifie qu'il existe une limite de durée d'éclairement en deçà de laquelle le phénomène ne peut s'accomplir.

Les températures élevées favorisent la bulbification, le grossissement et la maturité ainsi que l'installation de la dormance (CHAUX et FOURY, 1994).

- Sol et nutrition minérale

L'oignon préfère des sols légers et fertiles (RENAUD, 2003), peu profond, bien drainés, ayant une bonne capacité d'échange, du fait de son système racinaire peu développé. Il est peu tolérant à l'acidité du sol à pH > 6-6,5 (CLEMENT ,1981 ; CHAUX et FOURY, 1994). Il doit satisfaire ses besoins à partir d'un volume d'eau relativement réduit. (CHAUX et FOURY, 1994).

En cours de bulbification, une synthèse importante de glucides simples est indispensable, elle est favorisée par le potassium (métabolisme de l'eau) et par le phosphore (transfert d'énergie) (CHAUX et FOURY, 1994).

En revanche, l'azote nécessaire à la formation du bulbe, provient en grande partie des feuilles : les composés protéiques des feuilles sont progressivement hydrolysés ; les produits migrant vers le bulbe (CHAUX et FOURY, 1994).

-Alimentation hydrique

L'irrigation doit être suspendue à partir de la « tombaison » dans le but de hâter et homogénéiser la maturité et améliorer la conservation (CHAUX et FOURY, 1994).

6-4-Production

Le calibre moyen de l'oignon est : 30/50 mm. Les pratiques culturales favorisent le plus possible le taux de matière sèche (MS) tout en préservant un rendement pondéral élevé ; irrigation strictement limitée aux besoins et suspendue dès la fin du grossissement du bulbe, soit 8 à 10 jours avant la tombaison (CHAUX et FOURY,1994).

6-5-Récolte, conservation et conditionnement

- Récolte

La récolte de l'oignon de couleur se fait de juin à septembre à maturité lorsque les feuilles sont sèches (RENAUD, 2003);

Pour les oignons destinés à la conservation, ils sont d'abord arrachés, ils sèchent plusieurs jours sur le sol, puis ils sont conservés après équeutage et séchage , à 65% d'humidité relative (HR %) et à température de -3 à 0°C (CLEMENT ,1981).

Pour la vente en sec, le stade optimal est atteint quand le feuillage est aux 2/3 secs, ce qui correspond à l'arrêt de croissance et que les racines plus ou moins sèches ne retiennent plus le bulbe au sol (CHAUX et FOURY, 1994).

- Conservation

Ils sont soumis à un séchage complet immédiatement après récolte. Par temps sec et chaud, les oignons sont laissés au sol pendant quelques jours jusqu'à ce que les tiges vertes, la pelure et les racines soient complètement séchées (BURDEN et WILLS, 1992).

La nécessité de sécher l'oignon se fait pour plusieurs raisons. Entre autres le col des oignons est très sensible à la décomposition, s'il reste humide, surtout si les tiges vertes sont coupées avant la récolte (BURDEN et WILLS, 1992).

Il n'est pas recommandé de couper les tiges vertes des oignons (BURDEN et WILLS ,1992), éviter l'équeutage et l'excès d'humidité en cours de conservation (CHAUX et FOURY, 1994).

- Traitement industriel de l'oignon

La déshydratation concerne principalement l'oignon de couleur, qui fournit les meilleurs taux de matière sèche (MS).

L'oignon est très utilisé en industrie alimentaire : conserves appertisés (pois cuisinés, jardinières), potages déshydratés, charcuteries industrielles, condiment (petits oignons blancs confits au vinaigre) (CHAUX et FOURY, 1994).

Pour la déshydratation ; l'industrie recherche un taux élevé en MS (si possible > 15%). Le choix variétal et les pratiques culturales doivent être orientées vers le meilleur rendement en MS à l'unité de surface et à bulbes aussi gros que possible. (CHAUX et FOURY, 1994).

6-6- Composition chimique de l'Oignon

Le tableau 11 indique la composition chimique de l'oignon cru et séché.

Tableau 11 : Composition chimique de l'oignon cru et séché

Composants (g)	1	2	séché 2	Minéraux (mg)	1	2	séché 2	Vitamines (mg)	1	2	séché 2
Eau (g)	89	87,6	10,8	Minéraux (g)		0,59	4,2	Equ. β-Carotène (µg)	9	6,90	260,0
Protéines (g)	1,3	1,25	10,5	Na (mg)	6	0,25	105,0	C	7	7,13	42,0
Glucides disponibles (g)	7	4,91	35,3	Mg (mg)	10	9,50		B6	0,14	152(µg)	500,0 (µg)
-Amidon	tr	-	-	P (mg)	33	11,0	243,0	Folates (µg)	20	7,00	110,0
Fibres	1,8	1,81	36,48	K (mg)	170	42,0	1,04 (g)	Equ Rétinol (µg)	1,15	0,0-130,0	43,33
Lipides	0,2	0,25	0,93	Ca (mg)	25	135	162,0	Caroténoïdes totaux (µg)	6,90	0,00-780,0	260,0
Energie STD (kcal)	34	27,52	196,94	Fe (mg)	0,3	31	3,25	Proportion comestible /déchets (%)	0,92	8	0

(1) : FAVIER et COLL. (1995)

(2) : SOUCI et COLL. (1994)

C- Le séchage

BIMBENET (1984), rapporte qu'en 1982-1983 le tonnage de légumes déshydratés en France est de 6000 tonnes de produits secs et de 17000 tonnes d'eau éliminée par an, à quelque 2000 t/an pour les fruits déshydratés selon (BIMBENET et coll., 2002 a).

Les produits peuvent être séchés au soleil ou à la chaleur artificielle. Le séchage solaire est bon marché mais n'est pas aussi facile à diriger que la déshydratation obtenue par des moyens perfectionnés (BURDEN & WILLS, 1992).

Le secteur industriel global consacre environ 20 % de la consommation d'énergie aux opérations d'élimination d'eau, dont 60 % de cette consommation d'énergie sont consacrées par le secteur agro-alimentaire au séchage. L'évaporation d'un kilogramme d'eau nécessite selon VOILLEY et MOYNE (1990), une énergie théorique de 2,3 MJ environ.

Les séchoirs à air chaud, qu'ils soient de solides ou de liquides, relèvent des principes de l'entraînement et ils représentent le plus gros tonnage de produits séchés en industries agricoles et alimentaires (BIMBENET et coll., 2002 b).

1- Définitions

Le séchage étant considéré comme « l'opération unitaire qui consiste à éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (produit) ». Le corps humide peut être solide ou liquide, mais le produit final est solide (BIMBENET, 1984 ; BIMBENET et coll., 2002a ; CHARREAU et CAVAILLE, 1991).

L'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année) (BIMBENET et coll., 2002 b) .

2- Mécanismes d'élimination d'eau

L'élimination de l'eau peut être obtenue par voie mécanique ou thermique.

-Élimination par voie thermique

Ce type d'opération est essentiellement un transfert de masse nécessitant au préalable une « activation » de l'eau pour une certaine quantité d'énergie apportée par un transfert de chaleur. Les deux transferts se dédoublent en une phase externe et une phase interne :

- transfert de chaleur externe de la source de chaleur vers la surface du produit ;
- transfert de chaleur interne de la surface vers le cœur du produit ;
- transfert de masse interne du cœur vers la surface du produit ;
- transfert de masse externe de la surface du produit vers le milieu extérieur (MAFART, 1991).

La vitesse du processus global d'élimination d'eau est déterminée par le transfert limitant. Lorsqu'un transfert a lieu parallèlement par diffusion et par convection, c'est le processus de convection qui est prédominant. Au contraire, dans le cas de mécanisme en série c'est le plus lent qui déterminera la vitesse du transfert et constituera l'étape limitante. Dans la pratique, c'est toujours les processus diffusionnels qui sont limitants. Ainsi dans le cas du séchage d'un produit par de l'air chaud, l'étape limitante est le transfert externe de chaleur à travers la couche limite d'air lorsqu'on se trouve en début de séchage (phase de séchage à « vitesse constante »). En fin de séchage (phase de séchage à « vitesse décroissante »), le facteur limitant est le transfert interne de masse ; dans les deux cas ; l'allure du transfert est proportionnelle au gradient d'humidité (MAFART, 1991).

D'autres mécanismes interviennent ;

- en début de séchage une migration d'eau par expression après contraction de la matière à déshydrater ;
- une diffusion de vapeur due à un gradient de pression ;
- des mouvements par évaporation condensations successives ;
- des mouvements par désorption-adsorption successives (MAFART, 1991).

3 -Modes de séchage

Parmi les techniques d'élimination d'eau par voie thermiques, deux mécanismes peuvent être mis en œuvre pour extraire par évaporation l'eau d'un produit ; des procédés par ébullition et des procédés par entraînement (CHARREAU et CAVAILLE ,1991 ; MAFART, 1991 ; BIMBENET et coll., 2002 b):

*par ébullition, le produit est porté à la température telle que la pression de vapeur d'eau du produit devient égale à la pression totale ambiante régnant dans le sécheur .La température du liquide est donc déterminée par la pression d'ébullition (par exemple 100°C pour l'eau à $1,013 \times 10^5$ Pa) (MAFART, 1991 ; BIMBENET et coll., 2002 b ; CHARREAU et CAVAILLE ,1991)

*par entraînement, l'énergie est apportée par un gaz vecteur en mouvement généralement de l'air chaud. Ce gaz est conditionné de manière à ce que sa température soit supérieure à celle

du produit et la pression de vapeur P de l'eau dans le produit est supérieure à la pression partielle d'eau p dans l'atmosphère qui l'entoure (CHARREAU et CAVAILLE ,1991 ; MAFART, 1991 ; BIMBENET et coll., 2002 b). Il y'a séchage par entraînement, si P_t est la pression totale régnant dans l'installation, on a l'inégalité : $p < P < P_t$. Il s'agit en fait d'un transfert de masse par gradient de pression de vapeur d'eau (MAFART, 1991).

Ces deux mécanismes peuvent se succéder au cours d'une opération de séchage ou coexister dans un produit à un moment donné (BIMBENET et coll., 2002 b).

3-1-Mode d'apport de la chaleur

La vitesse à laquelle l'eau s'évapore est liée à l'allure d'apport de la chaleur latente d'évaporation. Cet apport est effectué :

- par conduction à partir d'une surface chauffée au contact du produit ;
- par génération interne de chaleur due à l'exposition à un rayonnement infrarouge ou de micro-ondes ou par chauffage diélectrique,

-par convection ;

--à partir de vapeur d'eau surchauffée ou d'un liquide non miscible à la vapeur d'eau. Dans ces cas, il y a nécessairement séchage par ébullition,

--à partir d'un gaz vecteur de chaleur (autre que la vapeur d'eau), ce gaz sert de vecteur à la vapeur d'eau et dans ce cas il y'a séchage par entraînement.

Le plus souvent, les trois modes d'apport de chaleur se combinent les uns aux autres. C'est ainsi que la conduction et la génération interne peuvent s'ajouter, de façon intentionnelle ou parasite, à la convection, dans le cas de séchage par entraînement (non isenthalpique dans ce cas) (BIMBENET ,1984; BIMBENET et coll., 2002 a).

L'eau est évaporée sans ébullition et la vapeur d'eau est transférée par conduction et convection du produit dans le milieu ambiant. Une partie au moins de l'énergie de vaporisation est apportée au produit par le gaz (le plus souvent l'air chaud) qui l'entoure. Le produit se met spontanément à une température telle que les transferts de chaleur permettent l'évaporation d'un débit d'eau égal à celui capable de traverser la couche-limite (compte tenu de ce qu'une partie de cette chaleur est utilisée pour échauffer le produit) (BIMBENET et coll., 2002 b).

3-2-Séchage par entraînement

Lorsqu'un corps humide est placé dans un courant d'air (ou un autre gaz) suffisamment chaud et sec, il s'établit spontanément entre ce corps et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tels que:

- un transfert de chaleur de l'air vers le produit sous l'effet de l'écart de température,
- un transfert d'eau en sens inverse du fait de l'écart de concentration en eau dans l'air.

Les concentrations de l'eau dans l'air sont exprimées en pressions partielles d'eau (P_a =Pascal) (BIMBENET, 1984).

Le séchage est dit « isenthalpique » si l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau, est exactement égale à celle apportée par l'air chaud (BIMBENET, 1984). Dans ce cas, il n'y a aucun autre apport de chaleur que la convection à partir de l'air chaud, ni aucune perte. La température à laquelle se met le produit ne dépend que des caractéristiques de l'air de séchage et de l' a_w de la surface du produit (BIMBENET et coll., 2002 b).

L'air sert donc à la fois de fluide chauffant et de gaz vecteur pour l'eau enlevée. Entrant sec et chaud dans le séchoir, il en ressort humide et moins chaud (BIMBENET, 1984).

Les procédés par entraînement permettent une élimination d'eau complète sans altération excessive de la qualité du produit traité. Le coût énergétique sans récupération d'énergie est entre 920 et 1800 kWh/tonne d'eau éliminée (MAFART, 1991).

4-Procédés de séchage

4-1-Pression de vapeur de l'eau du produit

Il ressort de la définition du séchage que la pression de vapeur de l'eau du produit est à la base de cette opération.

L'eau, a une pression de vapeur ne dépendant que de la température si elle est pure, non liée à d'autres molécules. Lorsqu'en revanche elle est intégrée à un produit, elle n'est en générale ni pure (elle contient des solutés), ni libre de liaisons avec des molécules insolubles, ni plane (si elle reste sous forme liquide, et remplit les pores, sa surface est en forme de ménisques) (BIMBENET et coll., 2002 b).

4-2- L'élimination d'eau

Tout produit humide doit être considéré schématiquement comme un système biphasé comprenant une certaine quantité d'eau sorbée par un substrat sec (MAFART, 1991). Le solvant dans le système est l'eau, et les constituants de l'aliment tels que sels, sucres, protéines, hydrates de carbone et d'autres, sont les solutés (RIZVI, 1995). La séparation des

deux phases suppose un certain travail nécessitant une quantité d'énergie minimale qui correspond à la rupture des forces liant les molécules d'eau au substrat sec. L'intensité de ces forces de liaison est très variable suivant leur nature (MAFART, 1991).

Le reflet le plus direct du « degré de liberté » de l'eau imbibant un produit est la pression de vapeur saturante P émise par ce produit en comparaison avec la pression de vapeur saturante P_0 émise par l'eau libre à la même température. Si l'eau se trouve à l'état libre dans le produit, on aura $P=P_0$ (MAFART, 1991).

A température constante, tous les composés et l'eau dans l'aliment sont dans un équilibre thermodynamique avec l'une et l'autre des phases adsorbée et de vapeur (RIZVI, 1995).

Si, au contraire, l'eau est liée au substrat sec par les forces de liaisons physico-chimiques, on aura : $P < P_0$ (MAFART, 1991).

4-2-1-Activité de l'eau (a_w)

L'absorption de la vapeur d'eau par les aliments est importante dans les processus de déshydratation, de conditionnement et de changement de la qualité du produit pendant le stockage (SARAVACOS, 1995).

« L'activité de l'eau du système vapeur-solide est définie comme le rapport de la pression partielle P à la pression de vapeur d'eau P_0 , à l'équilibre ».

$$a_w = P/P_0 = \text{HR}\%/100$$

où HR % : pourcentage de l'humidité relative de l'atmosphère environnante (SARAVACOS, 1995).

Le rapport $a_w = P/P_0$ qui définit l'« activité » de l'eau dans le produit, compris entre 0 et 1, est d'autant plus faible que les forces de liaisons internes sont intenses et tend au contraire vers l'unité lorsqu'on se rapproche de l'état libre (MAFART, 1991).

Au cours du processus de déshydratation, les molécules d'eau les moins liées sont d'abord éliminées et la dernière fraction extraite correspond aux molécules d'eau de structure, fortement liée aux macromolécules organiques d'extrait sec par les liaisons électrostatiques (MAFART, 1991).

Le taux d'humidité à l'équilibre (X_e) correspondant à une activité de l'eau et à une température, est déterminé expérimentalement et habituellement présenté en isotherme de sorption de l'eau ou d'humidité du produit (SARAVACOS, 1995).

L'activité de l'eau diminue en même temps que la teneur en eau et la courbe est appelée courbe de désorption (MAFART, 1991).

La figure 1 représente la relation entre le contenu en eau d'un produit humide avec l'activité de l'eau (ZIDOUNE, 2002), montrant les différents domaines de l'eau existant au sein du produit humide.

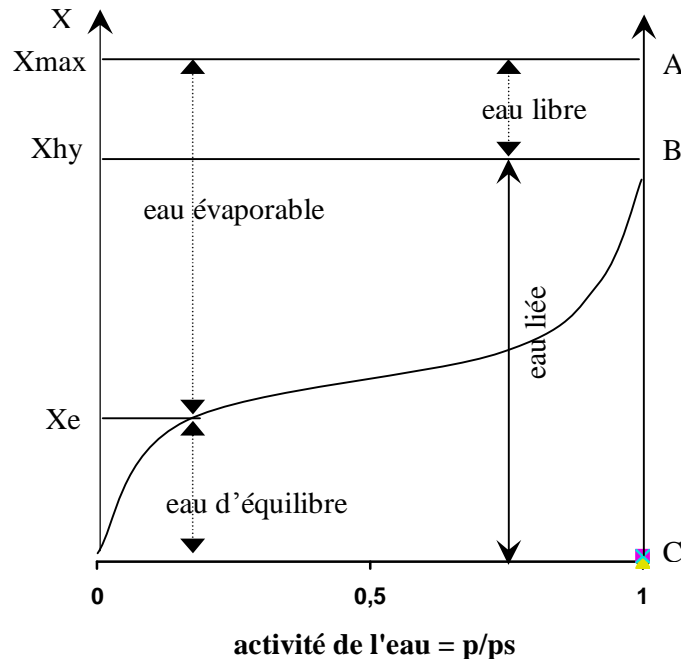


Figure 1 : Tracé montrant la relation contenu en eau-activité de l'eau d'un produit humide

AB : eau libre appelée « eau d'imprégnation » exerce une pression de vapeur égale à la pression de saturation ($a_w=1$).

En dessous de B : correspond à la limite hygroscopique (X_{hy}), l'eau restante du segment BC exerce une pression inférieure à la pression de saturation ($a_w < 1$), elle correspond à l'eau liée dont une partie peut être évaporée.

X_e représente l'humidité d'équilibre d'un aliment et correspond au taux limite de contenu en eau auquel cet aliment peut être séché. X_e dépend des caractéristiques opératoires (ZIDOUNE, 2002).

L'isotherme d'adsorption (ou de sorption) peut être divisée en deux parties (ALAIS et coll, 2004 ; ZIDOUNE, 2002), mais la courbe de désorption peut être plus ou moins arbitrairement découpée en trois domaines selon MAFART (1991) qui sont les suivants :

* $0 < a_w < 0.2$: Ce domaine correspond aux forces de Van Der Waals, très intenses, empêchant partiellement le mouvement moléculaire de s'exprimer pour une pression de vapeur saturante

(MAFART, 1991). L'eau est fortement retenue à la surface des molécules du soluté sous forme d'une couche mono moléculaire d'eau fixée et étroitement liée sur des groupes polaires des macromolécules -NH_3^+ et COO^- des protéines (MAFART, 1991 ; ALAIS et coll., 2004), OH des glucides, eau de cristallisation des sels et de certains glucides (ALAIS et coll., 2004), dont les molécules sont orientées, l'eau se trouve alors dans un état rigide (MAFART, 1991). L'eau liée représente environ 3-10 g/100g de poids sec (ALAIS et coll., 2004).

*** $0.2 < a_w < 0.6$** : Correspond à la partie linéaire de la courbe, dans cette zone intermédiaire, l'eau se trouve sous formes de couches poly moléculaires recouvrant partiellement la surface du substrat sec (MAFART, 1991). L'eau est faiblement liée (ALAIS et coll., 2004). Il y règne un équilibre entre les molécules rejoignant la couche mono moléculaire et celles qui, animées d'une énergie cinétique suffisante, s'en échappent (MAFART, 1991). Cependant, bien que libre, elle ne quitte pas facilement les tissus végétaux ; elle se trouve sous forme de gel et sa rétention est influencée par le pH, la force ionique, la nature des sels et certaines altérations (ALAIS et coll., 2004). L'état de l'eau dans cette zone, est appelé « pseudo-liquide » (MAFART, 1991).

*** $a_w > 0.6$** : Ce domaine correspond à la fraction d'« eau libre » qui se trouve à l'état liquide et qui n'est retenue à la surface du substrat sec que par des forces capillaires. C'est uniquement sous cette forme que l'eau est utilisable par les microorganismes et peut permettre les réactions enzymatiques, c'est pourquoi on l'appelle parfois « eau biologique ». C'est également sous cette forme uniquement que l'eau est mobilisable pour la solvatisation des ions et des molécules d'où son appellation d'« eau solvante » (MAFART, 1991).

4-2-2-Mesure de l'activité de l'eau

Le choix de l'une des techniques de mesure de l'activité de l'eau dépend du champ d'action, de l'exactitude, la précision et la rapidité de la mesure exigée et nécessaire. La précision de la majorité des méthodes se situe entre un taux de 0,01-0,02 unités d' a_w .

Les deux principales techniques utilisées sont : la méthode intégrale et différentielle (NEUBER, 1981 cité par RIZVI, 1995). Cette dernière emploie un seul échantillon, placé sous un environnement d'humidité relative qui augmente et diminue. Le contenu en humidité est mesuré après chaque équilibre.

La méthode intégrale consiste à placer plusieurs échantillons chacun sous des conditions d'environnements contrôlées et le contenu en humidité est mesuré jusqu'à atteindre un poids constant (RIZVI ,1995).

Pour générer les environnements et définir les conditions de mesure de l' a_w des aliments ; les dispositifs de mesure consistent en solutions saturées de sels, acide sulfurique et glycérol. Les solutions de sels saturées sont plus populaires, mais elles sont limitées parce qu'elles ne fournissent que des valeurs discrètes de a_w à différentes températures.

Théoriquement, à l'équilibre, l' a_w de l'échantillon est la même que celle de l'entourage environnant. En pratique, cependant, le vrai équilibre n'est jamais atteint parce qu'il exige une période de temps infiniment longue et le processus d'équilibre est terminé quand les différences successives de poids de l'échantillon deviennent inférieures à la sensibilité de la balance utilisée ; elle est appelée méthode gravimétrique (GAL, 1981 cité par RIZVI, 1995).

5- Différentes étapes du séchage d'un produit humide

5-1- Blanchiment

Les produits frais se détériorent et se décomposent après récolte sous l'action des enzymes qui sont des substances chimiques complexes présentes en très petite quantité dans tous les organismes vivants. Toutes les activités vitales sont placées sous leur dépendance, elles continuent à agir après la récolte, provoquant la décomposition naturelle des produits frais. Elles doivent être détruites si l'on veut pouvoir entreposer les produits transformés (BURDEN&WILLS ,1992).

5-1-1-Principe et objectif

Le blanchiment est un traitement thermique qui consiste à porter rapidement les légumes (quelques minutes) à 95-100°C puis à les refroidir rapidement pour éviter une cuisson trop importante (MAFART, 1991 ; BITON ,1999).

Le rôle du blanchiment qui constitue un prétraitement avant, séchage, est multiple:

-Destruction des enzymes susceptibles d'altérer les légumes est la fonction principale du blanchiment. Il est nécessaire de bloquer l'activité enzymatique pour éviter la dégradation des légumes au cours de la fabrication (brunissement, dénaturation de la saveur ou de la texture) (BITON, 1999).

-Désaération du légume : Le légume contient de l'air ou du gaz occlus dans les tissus. Les gaz (azote, oxygène) sont libérés lors du traitement thermique: ils peuvent entraîner des

oxydations (MAFART, 1991) plus ou moins importantes occasionnant des colorations anormales; en cours de cuisson du produit (BITON, 1999).

-Modification de la structure : Le blanchiment permet d'assouplir les légumes, faciliter les opérations et manipulations ultérieures (BITON, 1999) et l'élimination des faux goûts (MAFART, 1991).

5-1-2-Problèmes liés au blanchiment

Plutôt considéré comme un mal nécessaire, le blanchiment présente, de nombreux inconvénients (MAFART, 1991) ;

-Les pertes par dissolution : Le blanchiment entraîne la dissolution d'éléments solubles (sucres, nitrates, vitamines,..) (BITON, 1999). Un blanchiment se comporte comme un extracteur solide-liquide et entraîne ces pertes de matières solubles par lessivage et par diffusion : protéines, sucres, matière minérale, vitamines etc., d'où diminution de la valeur nutritionnelle du produit (MAFART, 1991).

-Pollution ; les eaux de blanchiment usées constituent une masse plus ou moins importante et concentrée d'effluents (MAFART, 1991)

-Consommation d'eau et de vapeur ;

-Consommation d'énergie; le blanchiment entraîne des dépenses d'énergie non négligeables. (MAFART, 1991).

-Pertes résultant de la thermosensibilité de certains composants :

Certains nutriments, notamment les vitamines, sont détruites par la chaleur. La perte en acide ascorbique (vitamine C) est la plus importante, car cette molécule est très sensible à la chaleur en présence d'oxygène.

Les chlorophylles, sensibles à la chaleur et particulièrement la chlorophylle a dont la dégradation en phéophytine entraîne un jaunissement plus ou moins prononcé des légumes verts (BITON ,1999).

Malgré tous ces inconvénients, le blanchiment reste indispensable dans de nombreux cas, son rôle dépend de l'opération ultérieure dont il constitue la phase préparatoire (MAFART, 1991) :

*Destruction enzymatique ;

*Facilitation de la réhydratation ;

*Réduction de la charge microbienne (MAFART, 1991).

5-1-3-Modes et méthodes de blanchiment

Le blanchiment par immersion du produit dans un bain d'eau chaude, ou par passage dans une atmosphère de vapeur.

Le blanchiment à l'eau bénéficie d'une grande souplesse de fonctionnement en ce qui concerne le réglage de la température (MAFART, 1991).

Les blanchisseurs à vapeur s'avèrent nettement moins polluants grâce à une meilleure rétention des constituants solubles. Enfin, la vapeur ne produit pratiquement aucun effet de lavage mais élimine moins efficacement les faux goûts que l'eau (MAFART, 1991).

Le refroidissement : Le mode de refroidissement le plus classique est l'immersion du produit dans l'eau après blanchiment. On peut remplacer l'immersion par une pulvérisation afin de réduire la consommation d'eau, on diminue ainsi le volume des effluents, mais peu de quantités absolues de matières organiques sont rejetées (MAFART, 1991).

5-2- Conditions de séchage

Les étapes suivantes sont consacrées au mode de séchage par entraînement, compte tenu de la large utilisation de ce dernier.

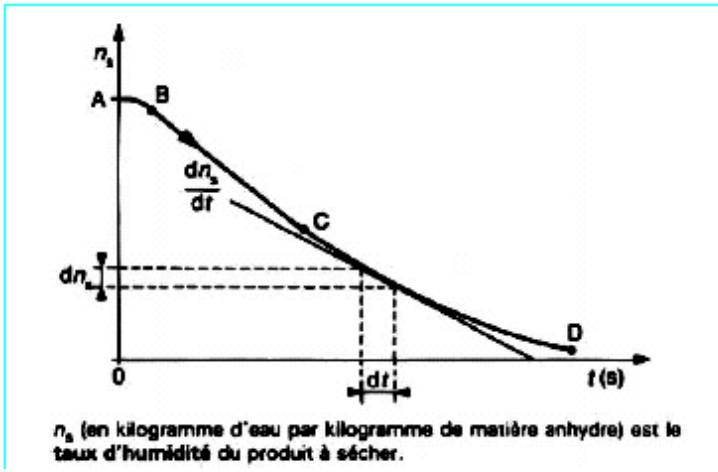
Dans les séchoirs de solides à l'air chaud, la méthode expérimentale la plus simple et la plus courante pour étudier le séchage par entraînement est que le produit se présente sous forme de particules (ex ; morceaux de légumes pour la fabrication de soupes déshydratées) (CHARREAU et CAVAILLE ,1991), il est déposé en couche mince (BIMBENET ,1984) (1 à 3 cm) sur des claies perforée fixes ou mobiles, ou des tapis mobiles (CHARREAU et CAVAILLE ,1991; BIMBENET et coll., 2002 b).

L'expérience de base dans tous les cas consiste, à soumettre le produit à un courant d'air chaud dont les caractéristiques ; vitesse, humidité relative et température sont contrôlées et maintenues constantes. Enregistrer les variations de la masse et du taux d'humidité du produit, à intervalles de temps réguliers (BIMBENET ,1984; BIMBENET et coll., 2002 b) ou éventuellement en continu (CHARREAU et CAVAILLE ,1991), à une température de l'ordre de 40°-100 °C.

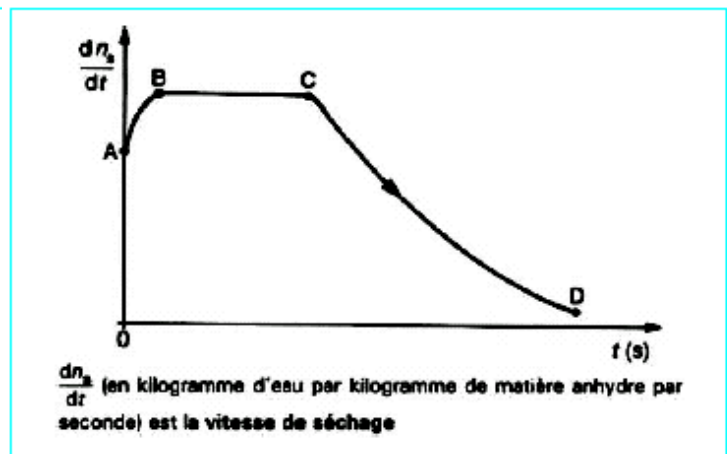
Le temps de séchage est de l'ordre de la dizaine de minutes pour les petites particules à la dizaine d'heures pour les plus grosses (BIMBENET et coll., 2002 b).

5-3-Cinétique et Obtention des courbes de séchage, et interprétation

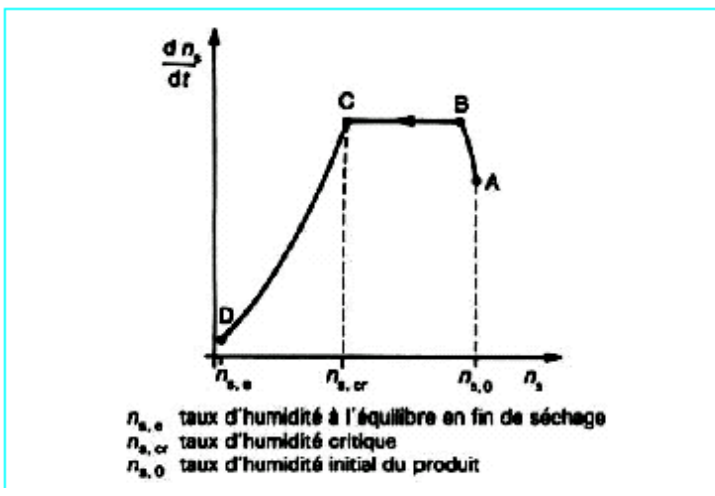
L'évolution du séchage est représentée en général par les courbes de la figure 2.



a) 1 - Courbe de séchage $n_s = f(t)$



b) - Courbe de séchage $\frac{dn_s}{dt} = g(t)$



c) 2 - Courbe de séchage

Figure 2 : Courbes de séchage ; a) $X=f(t)$; b) $dX/dt = f(t)$; c) $dX/dt=f(X)$
 (CHARREAU et CAVAILLE ,1991)

-Masse (m) ou teneur en eau (X) du produit en fonction du temps (t) ; la teneur en eau se calcule à partir d'un dosage d'humidité sur le produit séché ;

-Allure de séchage dm/dt ou dX/dt en fonction du temps: Elle s'obtient en dérivant la courbe précédente, soit au jugé (mesure des pentes), soit par des méthodes statistiques, à partir des résultats bruts ou sur la courbe « lissée » ;

-Allure de séchage en fonction de la teneur en eau dans le produit (X) (BIMBENET ,1984).

L'expression des cinétiques de séchage peut être représentée essentiellement par deux courbes selon BIMBENET et coll., (2002 b) comme suit:

-la teneur en eau moyenne (X) du produit en fonction du temps (t) ; (X) est définie comme le rapport de la masse d'eau qu'il contient à sa masse anhydre ; on obtient une courbe de séchage dont la forme la plus complète (c'est à dire lorsque toutes les phases de séchage existent) est donnée sur la figure 2; (BIMBENET et coll., 2002 b; CHARREAU et CAVAILLE, 1991)

-la vitesse de séchage ($-dX/dt$) en fonction de la teneur en eau moyenne (X) (BIMBENET et coll., 2002 b ; CHARREAU et CAVAILLE, 1991)

On remarque que sur cette courbe se présente différentes parties qu'il est possible de mettre en évidence en utilisant d'autres modes de présentations. En portant les différentes valeurs de la pente $X=f(t)$ (figure 2 a), en vitesse de séchage $-dX/dt$ en fonction du temps (figure 2 b) et ou en fonction de la teneur en eau X (figure 2 c) (BIMBENET ,1984 ; CHARREAU et CAVAILLE ,1991).

Ces trois types de présentations mettent en évidence l'existence de plusieurs phases pendant le déroulement du séchage. Toutes ne sont pas systématiquement observables, dans le cas où elles sont identifiables, il est distingué les 3 phases du séchage :

Sur les courbes typiques obtenues pour des produits non hygroscopiques comme la cellulose; trois périodes (phases) sont classiquement distinguées: (BIMBENET ,1984 ; BIMBENET et coll., 2002 a ; BIMBENET et coll., 2002 b ; MAFART, 1991).

5-4-Différentes périodes (phases) du séchage d'un produit humide

5-4-1- Phase (ou période) de mise en température

--**période 0** : mise en température du produit à sécher, dénommée phase transitoire de mise en température (AB, figure 2) (BIMBENET ,1984 ; MAFART, 1991 ; CHARREAU et CAVAILLE ,1991)

Elle n'est pratiquement pas détectée et n'a pas lieu lors du séchage des produits en particules ou en feuilles (BIMBENET, 1984 ; MAFART, 1991; BIMBENET et coll., 2002 a et BIMBENET et coll., 2002 b).

En pratique, cette période 0 passe inaperçue pour les produits de dimensions limitées (quelques mm), dans la gamme des températures ordinaires et avec les moyens ordinaires de détermination des courbes de séchage. On observe cependant que cette phase apparaît lorsque :

-les dimensions du produit deviennent importantes (plusieurs cm),

-l'écart entre sa température T_s est grand (des dizaines de °C),

Où lorsque la détermination de la courbe de séchage est très précise (BIMBENET ,1984)

5-4-2- Phase (ou période) à vitesse de séchage constante

--**période I**: période ou phase à allure (vitesse) de séchage constante (BIMBENET ,1984 ; MAFART, 1991 ; CHARREAU et CAVAILLE ,1991) ou il y'a évaporation superficielle d'eau libre (BC, figure 2) (BIMBENET ,1984)

Cette période de séchage à vitesse constante, correspond à l'évaporation superficielle de l'eau libre. Le produit reste en dehors du domaine hygroscopique, son a_w en surface proche de 1 (BIMBENET et coll., 2002 a; BIMBENET et coll., 2002 b). La surface du produit est donc saturée en eau (CHARREAU et CAVAILLE ,1991). L'air est alors saturé en eau : $a_{w,s} = 1$ et $i^* = 1$ (BIMBENET, 1984)

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 (CHARREAU et CAVAILLE ,1991).

La température du solide reste constante (uniforme) et égale à la température humide du fluide de séchage (l'air) (CHARREAU et CAVAILLE ,1991; BIMBENET et coll., 2002 a ; BIMBENET et coll., 2002 b), toujours inférieure à celle du thermomètre sec, T_a (MAFART, 1991)

L'écart de ces deux températures s'explique qualitativement par le fait que l'évaporation entraîne une consommation de chaleur latente qui refroidit la surface du produit. Cet écart, d'autant plus marqué que l'air est plus sec, tend vers zéro lorsque l'air est saturé en humidité, et l'allure de séchage tend vers zéro. Le transfert de chaleur et de masse ont donc atteint un

équilibre stationnaire, et l'eau à éliminer est de l'eau libre de pression de vapeur P^* (MAFART, 1991).

La phase à vitesse de séchage constante n'est pas toujours identifiable, et n'est pas observée dans de nombreux cas ; produits biologiques, notamment cellulaires même lorsqu'il s'agit de produits dont l'humidité initiale est très importante (produits végétaux, produits carnés) quelle que soit leur teneur en eau au départ (BIMBENET, 1984 ; CHARREAU et CAVAILLE, 1991).

La résistance due à l'imperméabilité des parois cellulaires, perturbent la migration rapide de l'humidité vers la surface des produits, certains phénomènes de croûtage et la migration de solutés, peut empêcher toute phase à allure constante (BIMBENET, 1984 ; MAFART, 1991 ; CHARREAU et CAVAILLE, 1991). La nature du solide n'intervient pas au cours de cette période, par contre sa forme peut influencer sur la vitesse de séchage (CHARREAU et CAVAILLE, 1991)

5-4-3- Phase (ou période) à allure (ou vitesse) de séchage décroissante

--**période II** : période de ralentissement (BIMBENET, 1984) ou phase à « allure décroissante » (MAFART, 1991), ou à vitesse de séchage décroissante (CD, figure 2) (CHARREAU et CAVAILLE, 1991; BIMBENET et coll. 2002 a; BIMBENET et coll. 2002 b).

La teneur en eau correspondant à la transition entre période I et II est appelée « teneur en eau critique » (X_{cr}) (BIMBENET, 1984), ou point critique du séchage C (CHARREAU et CAVAILLE, 1991) ; humidité en dessous de laquelle le séchage amorce la phase à allure décroissante appelée « humidité critique » par MAFART (1991) et RIZVI (1995).

Si le séchage se poursuivait indéfiniment dans le même air, l'allure de séchage tendrait vers 0 et le produit vers une teneur en eau limite (X_{lim}) (BIMBENET, 1984).

Dans cette période II de séchage à vitesse décroissante, l'humidité en surface du produit passe sous la limite supérieure du domaine hygroscopique, l' a_w en surface devient inférieur à 1, et les transferts internes de matière deviennent limitants. La température du produit augmente alors à partir de sa surface (BIMBENET et coll., 2002 a; BIMBENET et coll., 2002 b).

La figure 3 représente les courbes caractéristiques de séchages de certains produits.

Cette phase appelée période de ralentissement par BIMBENET (1984), succède à la phase à vitesse constante quand cette dernière existe. Le taux d'humidité à partir duquel la vitesse de séchage se met à décroître est le taux d'humidité critique X_{cr} qui n'est pas toujours

identifiable (CHARREAU et CAVAILLE, 1991). Quand les forces capillaires n'acheminent plus suffisamment d'eau à la surface du produit pour compenser l'évaporation (VOILLEY et MOYNE, 1990). A ce point, le contenu d'humidité dans l'aliment n'est pas suffisant pour saturer la surface entièrement. L'humidité critique augmente en générale avec l'épaisseur du produit et avec l'allure du séchage (RIZVI, 1995). Cette période de séchage à vitesse décroissante peut être divisée en deux ou trois sous-périodes. La totalité du séchage s'effectue à vitesse décroissante, avec une sous période à décroissance rapide, suivie d'une longue sous période à décroissance lente (BIMBENET et coll., 2002 a; BIMBENET et coll., 2002 b).

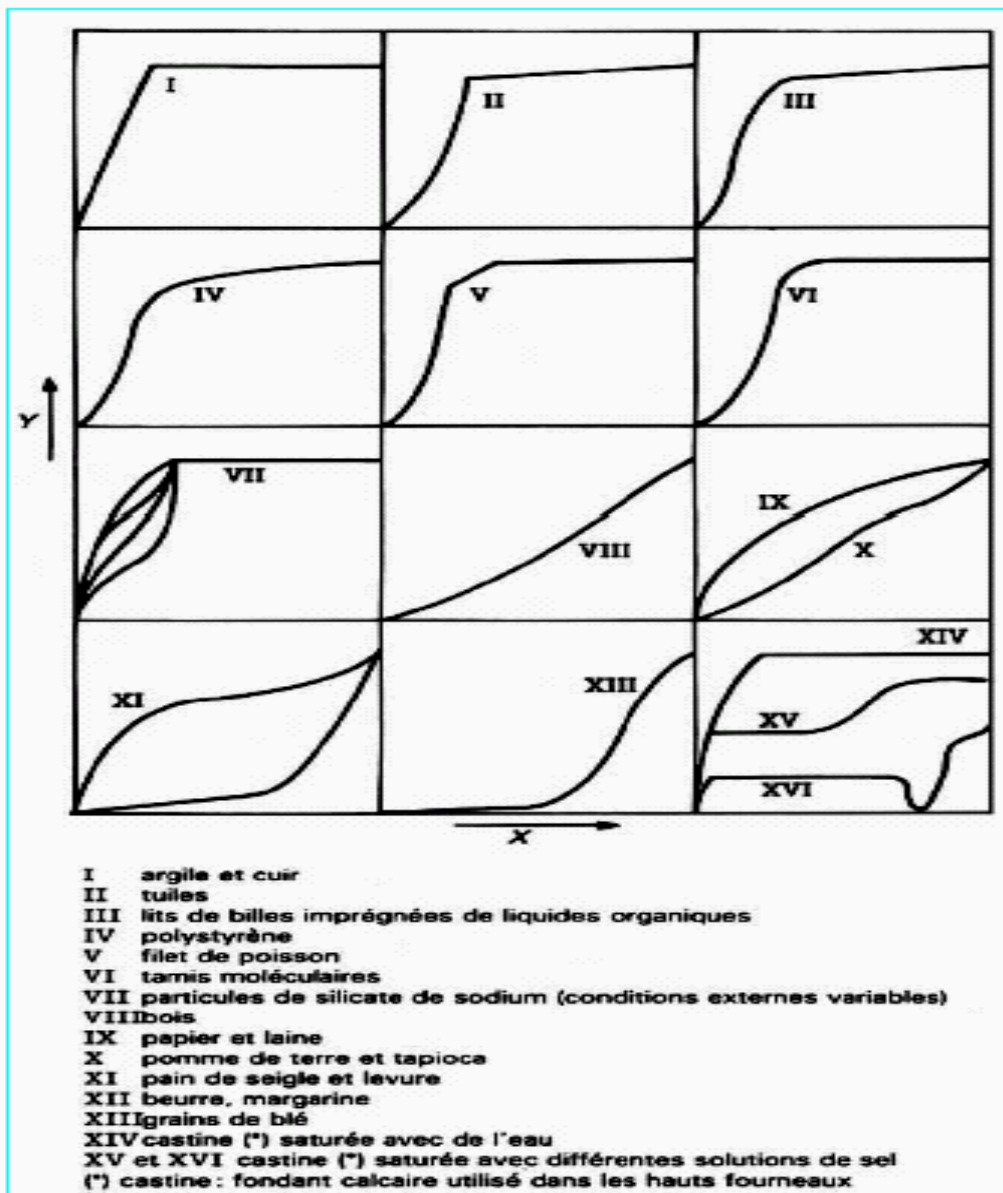


Figure 3 : Répertoire des différentes courbes caractéristiques, d'après VAN BRAKEL (1980) cité par CHARREAU ET CAVAILLE (1991)

5-5-Mécanismes intervenants au cours du séchage

5-5-1-Transferts de chaleur

Les transferts de chaleur mis en jeu dans tout procédé physique de conservation, sont soit par convection, soit par diffusion, soit par rayonnement (MAFART, 1991). Le séchage fait appel aux trois modes de transferts qui sont utilisés seuls ou combinés entre eux (CHARREAU et CAVAILLE, 1991).

La vaporisation du solvant contenu dans un produit à sécher peut être effectuée par abaissement de la pression dans l'enceinte contenant le produit. Cependant, dans la plupart des cas, la vaporisation est effectuée en utilisant une source d'énergie extérieure au produit (CHARREAU et CAVAILLE, 1991).

Suite à un gradient de température dans l'espace, une quantité de chaleur se déplace, il y'a transfert de chaleur. Tout transfert de chaleur entraîne l'une des deux conséquences suivantes (ou les deux) :

- changement d'état du corps qui reçoit ou cède de la chaleur (on parle de chaleur latente)
- variation de température du milieu qui reçoit ou cède de la chaleur (on parle alors de chaleur sensible) (MAFART, 1991).

1-Transfert par convection

En séchage industriel, il s'agit probablement du mode de transfert d'énergie le plus courant. Il consiste à mettre en courant un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent autour du corps à sécher qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de film ou de plaques (CHARREAU et CAVAILLE, 1991).

En régime convectif, la chaleur est directement transportée par son support, ce qui se traduit par un mouvement de fluide qui emmagasine la chaleur (air chaud, vapeur, eau, etc.), appelé « fluide caloporteur ». Dans la mesure où la chaleur n'a qu'à se laisser véhiculer par un fluide, la convection est un mode de transfert rapide (MAFART, 1991) ;

- Si le mouvement de fluide est renforcé par un travail mécanique « artificiel » (ventilation, agitation, pompage d'un fluide), on parle de « convection forcée ».

- Si au contraire, le mouvement du fluide n'est dû qu'à des courants thermiques ou des mouvements ascensionnels d'ébullition, la convection est dite « naturelle » (MAFART, 1991).

D'une manière générale, le temps de séchage est réduit lorsque la différence de température, entre le gaz et le produit, est augmentée. Toutefois la thermosensibilité du produit

(caractérisée par la température maximale qu'il peut supporter) limite la valeur de l'écart, notamment en fin de séchage (CHARREAU et CAVAILLE ,1991).

5-5-2-Transferts de chaleur et de matière

Le transfert de masse joue un rôle très important dans les opérations unitaires de base telles que le séchage. Dans ces opérations physiques, la résistance au transfert de masse constitue le facteur limitant, quoique le transfert de chaleur et le flux du fluide soient impliqués dans le conditionnement et la conservation où le transfert d'humidité, vapeurs, gaz et composés aromatique, influent sur la qualité de l'aliment (SARAVACOS, 1995).

Les difficultés d'application des théories de transfert de masse dans les processus de transformation des aliments résultent des structures physiques complexes et de la composition chimique des denrées alimentaires qui varient pour une même denrée et change pendant la transformation (SARAVACOS, 1995).

Il est à noter, la migration de l'eau (liquide ou vapeur) peut également s'effectuer par « filtration » à travers le produit poreux sous l'action d'une différence de pression entre l'intérieur et la surface (BIMBENET ,1984).

5-5-3-Transferts d'eau en séchage

Les corps à sécher sont constitués par une matrice continue, éventuellement interrompue localement, dans le cas d'un solide, par des pores pouvant déboucher à la surface de celui-ci. L'humidité peut se localiser aussi bien à la surface externe du produit que dans les pores ou au sein même de la matière (figure 4) (CHARREAU et CAVAILLE ,1991).

Le séchage peut être décrit comme un transfert d'eau couplé à un transfert de chaleur dans un matériau poreux non saturé. Dans les produits biologiques le transfert interne d'eau est souvent le phénomène limitant .La taille des pores et la distribution des rayons des pores dans le matériau influent sur le caractère hygroscopique du produit (plus les pores sont petits, plus le caractère hygroscopique est marqué) (BIMBENET et coll., 2002 b).

La vaporisation de l'eau nécessite un apport énergétique de source extérieure au produit à sécher. Simultanément se produit la migration de l'eau vers le milieu ambiant. La vitesse de ce transfert de matière varie au cours du temps. Elle dépend des conditions ambiantes (température, humidité relative, vitesse des gaz en contact avec le produit), mais aussi de la nature même du solide et de l'eau (CHARREAU et CAVAILLE, 1991).

Les difficultés sont plus complexes dans les aliments solides plus que dans les liquides.

Le transfert de masse implique un transfert d'une variété de composants avec la phase et en interphase par diffusion moléculaire naturelle ou par convection forcée. La masse est transférée par gradient de concentration ou de pression partielle (SARAVACOS, 1995).

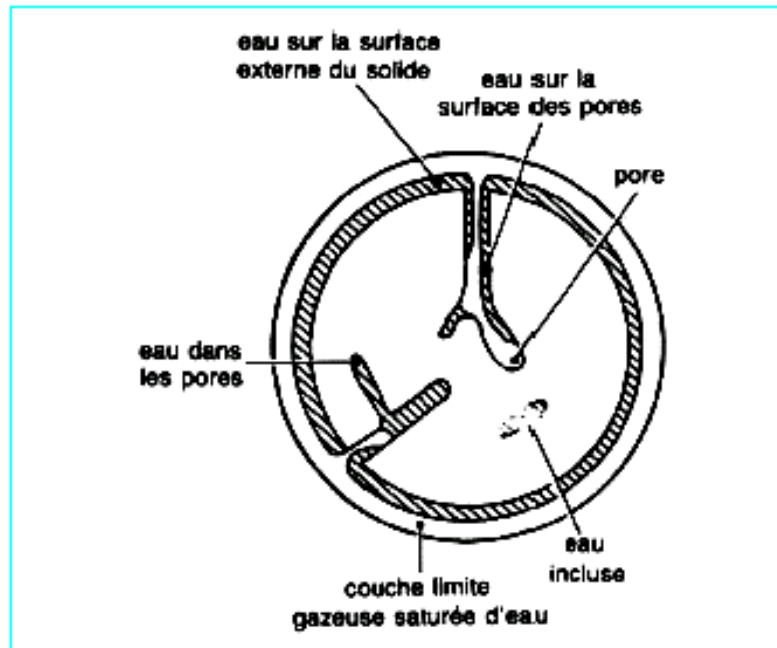


Figure 4 – Représentation schématique d'un solide humide
(CHARREAU et CAVAILLE, 1991)

5-5-4- Elimination d'eau par entraînement

5-5-4-1- Modes de transfert de matière

* Migration de la vapeur d'eau

La vapeur d'eau migre par convection dans les pores et par diffusion au travers des parois séparant les pores. Le flux convectif est provoqué par un gradient de pression de la phase gazeuse, et prend en compte le déplacement de la vapeur avec l'air sec.

La diffusion de la vapeur est quant à elle provoquée par le gradient de pression partielle de vapeur d'eau. Le flux est alors proportionnel à un coefficient de diffusion apparent, lié à la diffusion de la vapeur d'eau dans l'air, pondéré par la porosité et la tortuosité du matériau (BIMBENET et coll., 2002 b).

* Migration d'eau liquide

Généralement, trois mécanismes sont distingués, L'eau peu migrer sous l'influence ;

-d'un gradient de pression capillaire (liée à la tension superficielle et au diamètre des pores : les « petits » pores ont tendances à vider les gros) ;

- auquel peut s'ajouter un gradient de pression totale (filtration de Darcy) ;
- ou d'un gradient de concentration (diffusion moléculaire décrite par la loi de Fick).

Lors du séchage des produits alimentaires et biologiques, les phénomènes sont regroupés souvent dans une loi globale analogue à la loi de Fick. Où un coefficient global, appelé « diffusion apparente », qui le plus souvent dépend de la teneur en eau et de la température du produit (BIMBENET et coll., 2002 a; BIMBENET et coll., 2002 b).

Le transfert d'eau en séchage s'accompagne en outre d'une migration de solutés, de composés volatils et /ou de matières grasses qui provoquent diverses altérations du produit et modifient la dynamique de l'eau (BIMBENET et coll., 2002 b).

5-5-4-2-Mouvement de l'eau à l'intérieur des corps à sécher

Il ressort que, deux mécanismes principaux sont avancés pour expliquer le mouvement de l'eau à l'intérieur des corps à sécher (CHARREAU et CAVAILLE, 1991) :

- La diffusion ;
- La migration capillaire.

*La théorie diffusionnelle s'applique à des produits à structure continue. Cette théorie suppose que le mouvement de l'eau vers la surface du solide est gouvernée par la seconde loi de Fick qui permet d'exprimer le flux de matière au sein d'une particule en fonction du gradient d'humidité (CHARREAU et CAVAILLE, 1991) :

La diffusivité de l'eau dans des produits alimentaires à 50°C (en m² /s) ; ex : Pomme de terre de (0,9 à 1, 5).10⁻¹⁰. La diffusivité dépend de la nature du solide et celle de l'humidité, le taux d'humidité et la température.

*la théorie capillaire s'applique à des produits poreux ou granulaires.

La théorie repose sur le fait que le mouvement de l'eau dans les pores résulte d'un potentiel de succion. Dans le cas des produits à sécher où le mouvement de l'eau pendant la phase à vitesse décroissante est d'origine capillaire (CHARREAU et CAVAILLE, 1991)

6-Choix du mode de séchage

Les critères de choix du séchage thermique selon ZIDOUNE (2002) sont fait en fonction de

- la forme et la nature des propriétés du matériau
- la quantité d'eau à extraire du produit;
- la nature continue ou discontinue de l'opération

- le mode de chauffage
- le type de séchoir

Le séchage par entraînement est préféré dans les Industries Agro-alimentaires (IAA) selon BIMBENET (1984), parce que :

- le mode d'apport de chaleur par l'air chaud est plus simple à réaliser que par d'autres moyens ;
- l'air peut servir de moyens de transport du produit ;
- à pression ordinaire les températures des produits restent basses, donc la qualité préservée ;
- les allures de transferts, obtenues par des valeurs élevées de variation de température (ΔT) sont rapide, ce qui conduit à des séchoirs compacts (donc moins coûteux) et des temps de séjour courts (ce qui limite les dégradations des produits).

7- Séchage et qualité

La destination alimentaire du produit rend nécessaire, une particulière attention à sa qualité après fabrication et séchage (BIMBENET ,1984).

Toute élimination d'eau se heurte aux 2 problèmes majeurs suivants :

- *risques d'altérations de la qualité nutritionnelle et surtout organoleptique, du produit traité ;
- *consommation d'énergie considérable (MAFART, 1991).

Une température élevée pendant un certain temps provoque sur les produits biologiques des modifications, généralement considérées comme défavorables dont les principales sont :

- Modification biochimiques dues à la température ;
- Risques d'altération de la qualité du produit (BIMBENET ,1984).

8- Réhydratation

8-1-Diversité de contexte et d'objectifs

La réhydratation des légumes et fruits secs, prend place; soit dans l'eau bouillante, ou à la bouche lors de la consommation directe, soit pour instantanéiser, lors de formulation industrielle et préparation culinaire. Les situations physiques de réhydratation, sont :

- en stockage et manutentions ;
- réhydratation de particules solides ;
- réhydratation de poudres insolubles ;

- réhydratation de poudres solubles (comme le sucre) ou quasi-solubles (comme le lait ou le café qui sont en partie des suspensions fines ou colloïdales) (BIMBENET et coll., 2002 b).

8-2- Réhydratation de particules solides

Les solides (morceaux de légumes) sont immergés dans l'eau (l'eau de réhydratation n'est jamais pure ; dans les applications, il s'agit toujours d'une solution). Elle peut être exprimée par la vitesse de réhydratation, le taux de réhydratation ou « capacité d'absorption d'eau ».

Une courbe de réhydratation peut s'expliquer par les lois de diffusion et de mouvement capillaire, souvent, globalement interprétées sous forme de « diffusivité apparente » (BIMBENET et coll. 2002 b).

La réhydratation est le point faible de l'utilisation de la plupart des produits solides secs, pour les raisons suivantes :

- la vitesse de réhydratation, souvent jugée trop faible ;
- le taux de réhydratation, permettant rarement de retrouver la teneur en eau du produit initial ;
- la texture du produit réhydraté, souvent jugée molle, sans beaucoup de rapport avec le produit de départ ;
- la casse de certains produits (légumes secs) sous l'effet des phénomènes mécaniques
- la perte en solutés, rarement gênante dans la mesure ou l'eau de réhydratation est souvent consommée avec le produit réhydraté (ex : soupes séchées).

Les problèmes de taux et de vitesse de réhydratation et de texture sont liés ;

- aux déformations du solide lors du séchage liées au départ de l'eau , en particulier la rétraction, surtout des couches superficielles, qui écrase les cellules, donc diminue la porosité et la perméabilité de ces couches (croûtage) ;

- à la dénaturation des protéines, qui perdent une partie de leur capacité d'absorption d'eau.

Mais plus encore, celles des membranes cellulaires n'ayant plus leur capacité de perméabilité sélective, les cellules ont perdues leur aptitude à la turgescence, donc leur rétention d'eau et leur fermeté (BIMBENET et coll., 2002 b).

La quantité et la localisation des molécules d'eau qui participent à l'hydratation d'une protéine dépendent de la composition et de la conformation de celle-ci. La rétention d'eau peut être due aux forces de capillarité. la présence de parois cellulaires rigides (essentiellement végétales) développent des forces de rétention capillaires d'autant plus élevées que la taille des mailles est faible. On dit qu'il y'a rétention capillaire de l'eau (BLOND et LE MESTE, 1988).

9 - Le séchage solaire

L'énergie solaire est fréquemment utilisée comme source de chaleur dans les pays en développement. Les applications les plus courantes sont le séchage des produits agricoles.

Le séchage des récoltes avec l'énergie thermique du soleil se pratique depuis des siècles dans le monde entier, et il est de coutume d'étaler les récoltes en plein air au soleil, soit à même le sol, sur des plates-formes surélevées. Le procédé est peu coûteux mais n'est pas sans inconvénients.

Parmi les désavantages, l'intermittence de l'ensoleillement pendant la journée et aux différentes époques de l'année, les risques de contaminations par la poussière et les rongeurs, l'infestation par les insectes, etc.....

Le plus souvent, les récoltes et les denrées exposées au séchage en plein air incluent, les fruits, les légumes, viandes, poisson, grains et épices, tabac, café et cacao. La qualité des produits obtenus selon BASSEY (1983) est le plus souvent satisfaisante bien que susceptible d'amélioration.

Il est possible de disposer d'installations perfectionnées qui donneront un produit séché de très bonne qualité. La mise au point de séchoirs solaires destinés aux activités agricoles, avec des modèles de dimensions modestes, mais permettent d'abrégier la durée de séchage et d'obtenir un produit de meilleure qualité comparativement aux procédés traditionnels (BASSEY, 1983).

L'intensité de la radiation solaire à la surface de la terre est réduite par les nuages, les particules de poussières et des gaz par rapport à celle émise par le soleil. Son importance varie en fonction de l'endroit, de l'époque de l'année ; suivant l'heure du jour et des conditions atmosphériques générales.

La radiation solaire utilisable dans la plupart des cas pratiques est comprise entre 0,38 et 2 μm couvrant la portée visible (0,38 - 0,78 μm) et la proche infrarouge (0,78 à 2 μm).

La radiation globale ou insolation, comprend la radiation par rayonnement direct, la radiation diffuse et la radiation par réflexion. La première provient du soleil par un parcours linéaire, la seconde est répartie par toute la voûte céleste ou elle est dispersée par les gaz, les particules flottant dans l'air. La diffusion de la radiation peut varier de 10 % (par journée très claires) à 100% (par temps très couvert) de la radiation globale. Celle par réflexion est produite par des surfaces telles que murailles et construction, le sol ou d'autres matières.

La méthode la plus employée pour le séchage des récoltes dans les pays en développement où le procédé le plus fréquent est le séchage à l'air libre. L'utilisation de cette abondante

source d'énergie nécessite la réalisation de séchoirs solaires répondant à des besoins particuliers.

Les séchoirs agricoles utilisent l'énergie solaire de deux façons:les séchoirs actifs utilisent un ventilateur pour faire circuler l'air et les séchoirs passifs n'en utilisent pas.

S'inspirant du fait que l'air humide voit son humidité relative diminuer lorsqu'on le chauffe,pour construire des séchoirs solaires utilisant des procédés de chauffage de l'air ambiant,de façon directe et indirecte.

- Les séchoirs directs comportent une enceinte fermée munie d'un couvercle transparent. La récolte y est placée sur des claies et l'énergie solaire est absorbée à la fois par la récolte et par la masse interne du séchoir. La température en s'élevant déshumidifie la masse.

Leur efficacité dépend d'une bonne isolation (étanchéité satisfaisante de la couverture en verre ou en plastique). La température dans ces séchoirs peut s'élever à plus de 100 °C d'après le genre et la masse de la récolte à déshydrater, veiller à ce que le produit à obtenir ne soit pas surchauffé.

La couverture transparente peut être simple ou double épaisseur. La double couverture a pour effet de réduire les pertes de chaleur et d'augmenter la température dans la chambre de séchage. Elle a l'avantage d'abaisser suffisamment l'HR de l'air. Ce genres de séchoir a été utilisé pour l'okra,les oignons,les abricots,les raisins,l'ail,les prunes,pêches,choux fleurs,etc. (BRI,1979 ,BASSEY,1980 cités par BASSEY ,1983).

- Dans les séchoirs indirects, le mode de séchage est que l'énergie solaire n'entre pas directement en contact avec la récolte. L'air servant à la déshydratation est chauffé dans un collecteur d'air solaire et on le fait ensuite circuler à travers la récolte. L'air peut être mis en circulation par un ventilateur ou par simple convection naturelle.

L'énergie solaire est captée dans le réchauffeur d'air par effet de serre créé par la couverture transparente et l'absorbeur. En raison de sa légèreté, l'air chaud monte par le collecteur incliné jusque dans la chambre de séchage où est placée la récolte. L'air est soit forcé par ventilateur, soit il circule à travers la récolte par simple convection naturelle. BASSEY (1980a) cité par BASSEY (1983) fait état d'un séchoir simple, dans lequel l'air circule par convection naturelle. Ces séchoirs doivent porter l'air à des températures permettant de déshydrater les récoltes. En utilisant un simple vitrage et un collecteur bien isolé, on peut obtenir des températures de 140 °C sur la plaque absorbante (BASSEY, 1983).

III/ PARTIE EXPERIMENTALE

A/ Matériels et Méthodes

1/ Matériel végétal

Les denrées étudiées sont la carotte, la courgette, le cardon, la pomme de terre, l'ail et l'oignon. Les caractéristiques générales de ces denrées sont rassemblées dans le tableau 1.

Les échantillons utilisés sont prélevés directement, à partir des champs de culture, suivant la disponibilité et la maturité de chaque légume à différents endroits des wilayas de Mila et de Jijel.

1- 1- La carotte

C'est au niveau de Teleghma et Oued El-Athmania, wilaya de Mila, où la carotte (*Daucus carotta*) est la plus cultivée et présente des rendements assez élevés par rapport à d'autres régions de la wilaya. La variété cultivée présente des caractéristiques culturelles intéressantes. Il s'agit d'une variété algérienne: *Muscat d'Alger*. Cette variété est prélevée à maturité, elle présente à ce stade, une couleur orange.

La carotte, est prélevée régulièrement chaque 10 jours. Elle est acheminée au laboratoire couverte de terre pour une meilleure conservation et maintenue telle quelle dans des sacs en plastiques à température entre 7-10°C jusqu'à utilisation.

1-2- La courgette

La courgette (*Cucurbita pepo L.*) étudiée est issue d'une culture sous serre et provient de El-kennar, (wilaya de Jijel). La variété prélevée est un hybride F1 d'origine Hollandaise récemment introduite dans notre pays (trois ans), nommée *Cavilli*.

Étant donné sa fragilité, la courgette est prélevée tous les quatre à cinq jours. La variété utilisée est de couleur vert clair. Elle est entreposée dans un cageot en plastique couverte de papier journal à température de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à utilisation.

1-3- Le cardon

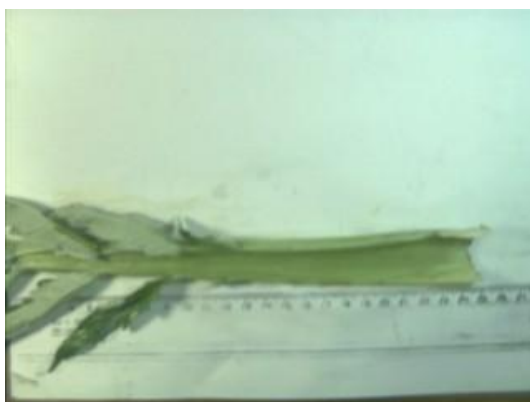
Le cardon (*Cynara cardunculus L.*) provient d'une culture de plein champ. La variété étudiée est *Cardon plein blanc Inerme* de couleur vert foncé. Il est cueilli en pieds entiers avec les feuilles tous les 4 à 5 jours. Afin d'éviter leur déshydratation au laboratoire, l'extrémité située à coté du pivot est plongée dans l'eau courante et maintenue à $25 \pm 2^\circ\text{C}$ jusqu'à utilisation.



a- Carotte de variété locale ; *Muscat d'Alger*



b- Courgette de variété *Cavilli*



c- Cardon de variété : *Cardon plein blanc inerme*



d- Pomme de terre de variété : *Blanc burane* apparentée à la variété *Ajiba*



e- Ail de variété *El-Marhaba* apparenté à la variété *Germidour* ayant pour population d'origine; *Violet de Cadours*



f- Oignon de variété : *Oignon rouge d'Amposta*

Figure 1 : Photos des légumes utilisés dans l'étude:

a- carotte ; b- courgette ; c- cardon ; d- pomme de terre ; e- ail ; f- oignon

Tableau 1 : Caractéristiques générales des 6 légumes étudiés

Légume	<u>carotte</u>	<u>courgette</u>	<u>cardon</u>	<u>pomme de terre</u>	<u>ail</u>	<u>oignon</u>
Famille	Ombellifères	Cucurbitaceae	Asteraceae	Solanacées	Liliaceae	Liliaceae
Genre	<i>Daucus</i>	<i>Cucurbita</i>	<i>Cynara</i>	<i>Solanum</i>	<i>Allium</i>	<i>Allium</i>
Espèce	<i>Daucus carotta</i>	<i>Cucurbita pepo</i>	<i>Cynara cardunculus</i>	<i>Solanum tuberosum</i>	<i>Allium sativum</i>	<i>Allium cepa</i>
Variété	<i>Muscat d'Alger</i>	<i>Cavilli</i>	<i>Cardon plein blanc</i>	<i>Blanc burane</i>	<i>El-Marhaba</i>	<i>rouge d'Amposta</i>
Nom: Arabe	جزر	كوسى	خرشف	بطاطا	ثوم	بصل
	carotte	courgette	cardon	pomme de terre	ail	oignon
	carrot	squash courgette	cardoon	potato	garlic	onion
	légume racine	légume fruit	légume tige	légume tubercule	légume racine ; bulbe	légume racine; bulbe
Lieu de culture	Teleghma et O-Athmania (Mila)	El-kennar (Jijel)	Teleghma (Mila)	Ferdoua (Mila)	Teleghma (Mila)	Douar el-bidi (Mila)
Durée de culture	3 à 4 mois	45 à 60 jours	5 à 6 mois	3 -5 mois	9 mois	3 à 4 mois
Période de récolte pour l'étude	fin décembre 2005 à fin février 2006	début février à début avril et mai 2006	mai et novembre 2006	juin à début juillet 2006	mai à début juin 2006	juin à début juillet 2006
Stade de récolte	maturité	Avant maturité	maturité	maturité	maturité	maturité
Forme	cylindrique oblongue à cylindro-conique	cylindrique oblongue	tiges -côtes épaisses et pleines	tubercule plus ou moins oblong	12 à 16 caïeux/gousse en globe	globe ; circulaire, aplati ou allongé
Longueur	13 à 20 cm de long	15à20cm de long	1,2 à 1,3m de hauteur de tiges	8,24±0,98 cm de long	5,5à6cm de long	5,8±0,59 cm de long
Diamètre, largeur	2,5 à 5 cm	2,9 à 4,7cm	cotes de 1,1 à 2,1cm de largeur	5,4 à 6,2 cm	4,1 à 4,6 cm du bulbe	6,5 à 7 cm
Couleur	orangé à jaune orange	vert clair	vert foncé	jaune	blanc ivoire, enveloppe rose à mauve	rouge et rosée

1-4- La pomme de terre

La pomme de terre (*Solanum tuberosum*) est prélevée recouverte de terre chaque 20 jours à partir d'un champ de culture. La variété étudiée est *Blanc Burane*, de peau jaune mi-rugueuse. Elle est conservée à l'abri de la lumière à température de $27\pm 2^{\circ}\text{C}$ jusqu'à utilisation.

1-5- L'ail

L'ail (*Allium sativum L.*) est prélevé à partir d'une culture de plein champ chaque 15 jours. Le bulbe et les gousses sont recouverts d'une tunique de couleur mauve à rose. La variété étudiée est *El-Marhaba*. Les échantillons sont conservés au niveau du laboratoire dans un sac en plastique à température ambiante de $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ au cours de son utilisation.

1-6- L'oignon

L'oignon (*Allium cepa*), est prélevé avec bulbe et tige (collet) chaque 20 jours. La variété étudiée est *oignon rouge d'Amposta*. La couleur de la tunique est rouge à mauve foncé. Les bulbes sont maintenus au laboratoire, à l'abri de la lumière à température de $27\pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant leur étude.

2 / Matériel

2-1- Matériel de découpe

Le matériel utilisé pour la découpe des échantillons de légumes est le suivant:

- * un guide à spires permettant d'insérer la lame d'un couteau et de faire varier l'épaisseur des morceaux découpés entre 5,5 et 13 mm.

- * un système de découpe comportant une série de quatre lames de couteaux rigides en parallèles espacées de 5; 8 ou 12 mm et permettant de découper les produits à ces trois dimensions.

Les schémas a et b de la figure 2 montrent les différents outils utilisés pour la découpe des échantillons.

2-2- Matériel pour blanchiment

Le blanchiment a été réalisé par mise en contact de la vapeur d'eau avec les légumes, en utilisant un couscoussier avec ses deux composantes.

- la passoire où sont placés les échantillons à blanchir (de 10 cm de hauteur avec des diamètres du fond de 15,5 cm et le haut de 20cm).

-une marmite contenant de l'eau chauffée pour générer de la vapeur au niveau du couscoussier.

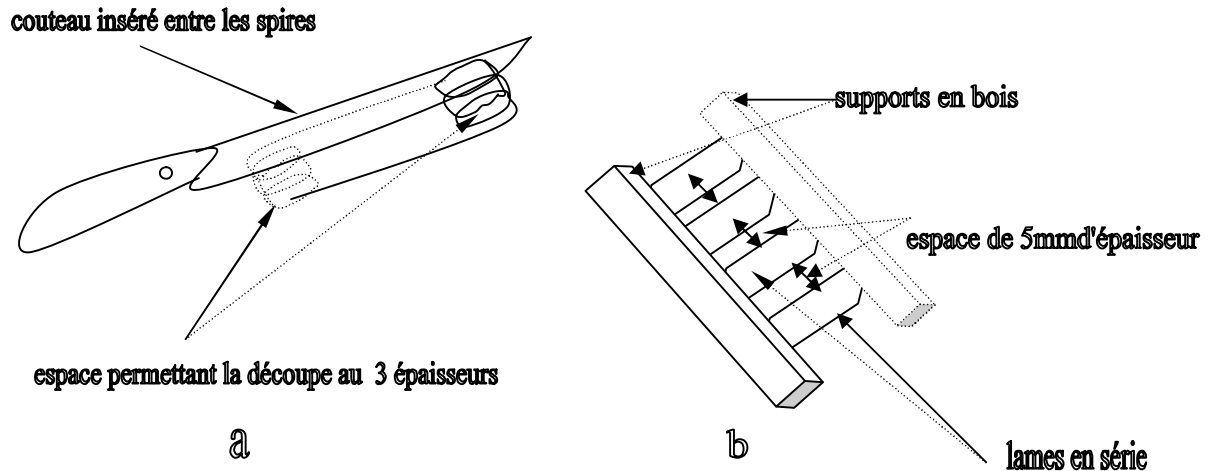


Figure 2: Outils de découpe
a) guide à spires avec lame de couteau
b) outil de découpe confectionné de 5 ,8 ou 12 mm d'épaisseur

2-3- Matériel pour l'étude du séchage

- Un thermomètre gradué de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ est placé au centre du sécheur armoire permettant de suivre l'évolution de la température interne du sécheur; et au niveau de la sortie du réchauffeur solaire pour indiquer la température de l'air acheminé vers la chambre de séchage des échantillons.

- un thermocouple numérique à sonde mobile de marque HANNA instruments, Minitherm HI 8754, écart de mesure de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $780\text{ }^{\circ}\text{C}$, il permet les mesures des températures de l'air à l'entrée, et à la sortie des séchoirs avec mesure de la température du thermomètre humide pour approcher l'humidité relative de l'air.

2-3-1- Sécheur armoire à air chaud

Le séchoir (de marque MAXEI, type MC-100) est une armoire de séchage fonctionnant en discontinu par ventilation d'air chaud. Les dimensions de cette armoire sont de $1,26 \times 1,44 \times 1,19\text{ m}$, correspondant à un volume utile de $2,16\text{ m}^3$. La température maximale est de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'entrée et la sortie de l'air sont dotées de papillons permettant le réglage du débit d'air.

2-3-2- Sécheur solaire

Le sécheur solaire utilisé est confectionné au niveau de l' INATAA, se composant de deux compartiments distincts, un réchauffeur solaire et une chambre de séchage assemblés sur un support à pieds surélevé à 20 cm de la surface du sol (figure 3).

Le réchauffeur solaire consiste en un compartiment de forme parallélépipédique de 1 m de longueur, 0,5 m de largeur et 0,3 m de hauteur. Sur le fond de celui-ci est déposée une plaque de polystyrène comme agent isolant. Afin de favoriser la rétention de la chaleur au niveau de ce compartiment, du charbon est utilisé comme réserve de calories (rôle de corps noirs). Ce charbon est utilisé sous forme pulvérisée étalé sur la plaque de polystyrène (granulométrie: 1,4 mm) et en morceaux (de 1,5-2 cm) suspendus en monocouche dans du tulle. La masse totale de ce charbon est de 1.9 kg.

Le réchauffeur est recouvert d'un film en polyéthylène pour créer l'effet de serre. Une inclinaison d'un angle de 20° est assurée afin de faciliter l'ascendance de l'air vers le compartiment suivant. La surface d'échange du film est évaluée 1,10 m² avec un volume global de 0,33 m³. Ce compartiment est doté de deux ouvertures de forme rectangulaire, d'une longueur de 20 cm sur une largeur de 15 cm.

La chambre de séchage, construite en bois contreplaqué (hauteur 80 cm, longueur 70 cm et largeur 50 cm), est munie de deux tiroirs grillagés servant de supports pour les échantillons à sécher. Une ouverture sous forme circulaire d'un diamètre de 20 cm, permet au sommet de ce compartiment l'échappement de l'air humide.

Performances du sécheur : l'ensemble du sécheur fonctionne avec le principe du séchage indirect où les produits à sécher ne sont pas directement exposés au rayonnement du soleil. Le collecteur d'énergie convertit les rayonnements solaires en chaleur par effet de serre et permet de chauffer l'air. Le rayonnement est variable dans le temps, selon les conditions climatiques. Malgré cette variation de l'ensoleillement et une température de l'air frais de 30 à 40°C, les essais préliminaires ont permis d'enregistrer avec le compartiment collecteur fermé ; des températures allant jusqu'à 72°C avec une moyenne de 65°C.

L'ensemble du séchoir solaire est présenté en figure n° 3 a et 3 b (photo), montrant les deux éléments du séchoir sur leur support.

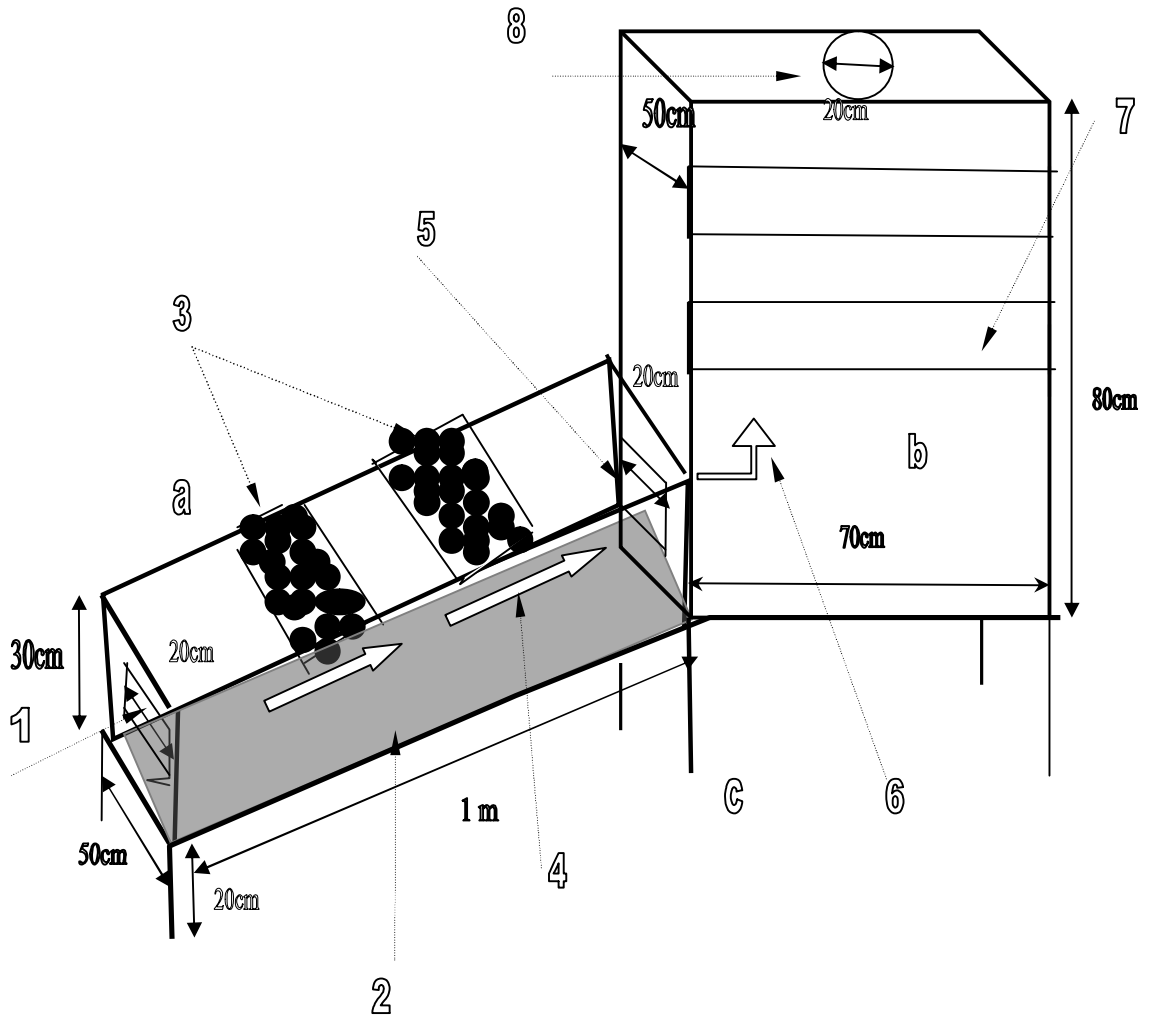


Figure 3a : Schéma représentant les différentes parties du sécheur solaire

a- collecteur d'air couvert d'un film de polyéthylène:

1-ouverture d'entrée de l'air ambiant

2-plaque de polystyrène, couverte d'une couche fine de charbon pulvérisé

3-couches de charbon suspendues

4-passage de l'air en se chauffant entre les deux couches de corps noir

5-passage de l'air chaud à travers l'ouverture de la chambre de séchage

b- chambre de séchage

6-ascension de l'air chaud vers les claies

7-tiroirs à fond en claies où sont mis les produits à sécher

8-ouverture de sortie de l'air humide

c- support en métal de l'ensemble maintenu à 20cm du sol.



Figure 3 b : Photo du séchoir solaire avec ses deux éléments

3- Méthodes

3-1- Humidités et activité de l'eau

3-1-1-Détermination de l'humidité des légumes

Avant d'entreprendre notre étude de déshydratation, nous devons connaître la valeur de la teneur en eau (humidité initiale) de nos denrées fraîches. La méthode d'analyse utilisée dans notre travail, est relative aux produits dérivés des fruits et légumes ; elle permet la détermination de la teneur en matière sèche par dessiccation sous pression réduite. Cette méthode est tirée de la norme AFNOR N° NF V05-105 de janvier 1974 (édition 1986).

Le principe consiste à homogénéiser le produit et le chauffer jusqu'à une masse constante sur une surface absorbante (papier filtre) à 70 °C sous une pression réduite à 30 mbar.

L'homogénéisation est assurée en prélevant trois morceaux des différentes parties du légume. Ces morceaux sont râpés, étalés en couche mince, pesés et mis à sécher dans l'étuve à 70°C, et pression de 30 mbar pendant 3 à 4 heures. Deux déterminations sur le même légume sont effectuées. La teneur en eau est exprimée en pourcentage par rapport à la masse totale humide, comme suit :

$$\text{Pourcentage en masse sèche : } \frac{(m_2 - m_0) \times 100}{m_1 - m_0} \text{ en g/100 g de produit brut.}$$

La teneur en eau sur base humide est obtenue en pourcentage par la différence :

$$100 - \text{masse sèche}$$

Où, m_0 est la masse en g de la boîte de Pétri avec le papier filtre ;

m_1 est la masse en g de la même boîte contenant la prise d'essai avant dessiccation ;

m_2 est la masse en g de la boîte avec prise d'essai après dessiccation.

Le résultat pris est, la moyenne arithmétique de deux déterminations, si la condition de répétabilité est remplie, à savoir que si deux essais effectués, la différence des résultats ne dépasse pas les 2% (en valeur relative) pour des teneurs en matière sèche inférieures ou égales à 10 g pour 100g d'échantillon (cas de la carotte, la courgette et le cardon) et 1% (en valeur relative) pour des teneurs en matière sèche supérieures à 10 g pour 100 g d'échantillon (cas de la pomme de terre, l'ail et l'oignon).

La détermination de la teneur en eau initiale a été réalisée à chaque arrivage de la matière première au niveau du laboratoire. Le nombre de mesures par légume est de 8 pour la carotte, 10 pour la courgette, 03 pour le cardon, 04 pour la pomme de terre et l'ail, et 06 pour l'oignon. Les résultats sont présentés avec la moyenne et écart type dans le tableau 8 dans la partie résultats et discussions (page 90).

3-1-2-Température et humidité relative (HR) de l'air

Compte tenu de la difficulté de réaliser la mesure de la température du thermomètre humide à l'intérieur du séchoir sans perturber le séchage en cours, l'HR est évaluée au niveau de l'air de sortie à intervalle de temps d'une demi-heure et d'une heure.

La température est mesurée à l'entrée, à l'intérieur de l'armoire de séchage, et à sa sortie. L'air de sortie se charge d'humidité lors du séchage des échantillons de légumes.

Cette estimation de l'évolution de l'HR de l'air n'est qu'approximative, compte tenu de la précision limitée du thermocouple utilisé qui n'affiche pas de décimale.

L'approche de l'HR est effectuée par la mesure de la température dite du thermomètre sec et de la température du thermomètre humide, à la sortie du sécheur. La température humide est notée au moment où elle se stabilise, au moyen de la sonde du thermocouple, recouverte d'une mèche de coton constamment imbibée d'eau distillée.

L'humidité relative est déterminée à partir du diagramme enthalpique de l'air humide.

Les mesures des températures de l'air de séchage sont effectuées à intervalle de temps d'une demi-heure à une heure au cours de chaque expérience de séchage. La moyenne de 7 à 10 mesures par expérience et par température de séchage avec l'humidité relative correspondante, est résumée dans le tableau 2.

Tableau 2 : Température et humidité relative (HR) moyennes au cours du séchage des différents légumes

Légume séché	Paramètres	entrée	interne	sortie du séchoir			
		Ta	Ta	Ta	Th	HR	H
Carotte	85°C	15,8±1,5	85,1±0,8	76,4±0,8	22,1±3,0	1,0±0,04	81±1
	70°C	13,6±0,8	69,9±0,2	64,4±0,2	22,5±1,7	4,0±0,4	70±4,3
	60°C	13,8±0,8	60,3±0,3	55,5±0,4	21,1±0,6	4,8±0,1	62,3±1,7
Courgette	85°C	14,8±1,7	85,2±0,6	75,8±0,6	23,3±2,5	0,7±0,2	82,4±5,4
	70°C	21,2±1,1	70,5±0,4	65,1±1,6	22,6±0,9	3,8±0,6	70,3±4,8
	60°C	21,8±1,0	62,2±0,6	57,6±0,4	22,4±0,9	4,8±0,1	64,8±3,2
Cardon	85°C	24,0±0,4	84,6±0,2	74,0±0,2	27,5±0,1	1,9±0,9	87,7±0,8
	70°C	25,1±1,0	70,4±1,0	64,0±0,9	24,3±0,7	2,5±0,8	84±2,8
	60°C	28,8±0,1	62,3±0,4	57,8±0,1	27,4±0,3	6,9±0,5	80,6±0,5
P. de t	85°C	31,6±1,7	85,6±0,3	76,8±0,5	29,4±0,5	1,1±0,4	97,0±2,6
	70°C	31,2±1,4	72,7±0,1	66,3±0,3	27,4±1,0	2,3±0,8	86,3±4,7
	60°C	30,5±0,9	63,1±0,7	58,0±0,6	26,5±0,5	5,1±1,0	82,7±2,4
Ail	85°C	27,8±1,2	84,3±0,8	75,4±1,6	30,0±1,0	1,9±0,4	91±3,0
	70°C	29,4±0,3	70,9±0,8	63,9±0,1	26,4±0,03	2,5±0,2	84,1±1,5
	60°C	25,5±1,1	61,5±0,3	56,5±0,4	26,5±0,1	6,6±0,4	81,1±0,5
Oignon	85°C	27,0±2,0	85,4±0,5	76,6±0,8	28,9±0,7	0,9±0,5	95,4±2,2
	70°C	25,3±2,1	72,5±0,9	67,5±1,4	26,5±0,9	1,8±0,7	82,2±3,2
	60°C	24,1±2,5	60,9±0,8	56,2±2,0	26,1±0,9	5,8±1,4	80,2±3,2

Ta: température sèche (°C), Th: température humide (°C); HR: humidité relative (%);

H: enthalpie en kJ/kg d'air sec

3-1-3- Mesure de l'activité de l'eau (a_w) des légumes

La mesure de l'activité de l'eau est réalisée afin de situer l'humidité résiduelle des légumes après séchage. La détermination de cette activité de l'eau sur les échantillons frais n'a pu être effectuée que pour l'ail, l'oignon et la pomme de terre pour des raisons de disponibilité de matériel de mesure.

Cette mesure n'étant pas prévue dans les objectifs de notre étude, les morceaux de légumes séchés et conditionnés (par température et par épaisseur) ont été réservés pour d'autres tests. La conduite de cette mesure a été réalisée avec des mélanges de morceaux de légumes séchés à différentes températures et différentes découpes selon leur disponibilité dans le but d'une estimation globale du niveau d' a_w de produits séchés.

La détermination de l'activité de l'eau est réalisée par la méthode dite de LANDROCK et PROCTOR (1951) cité par MULTON (1991) qui permet, par interpolation graphique, de déterminer l'humidité relative d'équilibre (HRE) qui n'entraîne aucune variation de masse de l'échantillon.

Des solutions d'acide sulfurique préparées à différentes concentrations, pour donner des humidités relatives correspondantes sont maintenues à une température fixe en présence d'un échantillon de légume jusqu'à poids constant de ce dernier.

A partir de l'acide sulfurique pur à 98% et de densité 1,84, des solutions diluées dans l'eau distillée sont préparées à différentes concentrations en pourcentage volumique (%v/v = volume de soluté par 100 volume de solution) pour assurer des humidités relatives (HRE:humidité relative d'équilibre) imposées au dessus de chaque solution comme indiqué ci-dessous (MULTON, 1991):

-pour les produits riches en eau :

Concentration d' H_2SO_4 en %(v/v) :	06	12	15	20
H.R.E. correspondante en % à 25°C :	96,6	92,72	90,91	87,55

-pour les légumes séchés :

Concentration d' H_2SO_4 en %(v/v) :	36	46	64	88
H.R.E. correspondante en % à 25°C :	64,57	43,82	10,89	0,082

La pomme de terre est lavée et épluchée, et les enveloppes de l'ail et l'oignon sont enlevées. Pour ces légumes testés avant séchage ; les deux premiers sont râpés et le dernier est découpé en fins morceaux, pour permettre l'échange avec les solutions d'acide. Les légumes séchés sont broyés finement en poudre dans un mixer (pendant 45 à 60 secondes); ainsi la surface

d'échange est augmentée permettant de faciliter l'échange avec l'atmosphère des solutions d'acide.

Les échantillons de légumes destinés à la mesure, sont pesés dans des coupelles en plastique, tarées au préalable, et placés au dessus des différentes solutions d'acide à l'intérieur des bocaux qui sont fermés hermétiquement et laissés à la température ambiante de $25 \pm 3^\circ\text{C}$. Chacun des produits est placé au-dessus de quatre solutions à HRE différentes. L'expérience est répétée trois fois pour chaque mesure. Les pesées sont réalisées à intervalle de 4 à 6 heures quotidiennement jusqu'à stabilité de la masse (de $\pm 0.01\text{ g}$ de variation).

Les résultats sont exprimés pour chaque prise d'essai, par la différence de masse obtenue de chaque concentration et rapportée à la masse initiale. Les valeurs obtenues sont portées sur un graphe en fonction de l'HRE correspondante. Le point d'intersection avec l'axe des abscisses donne la valeur de l'HRE du produit, et par conséquent, celle de l'activité de l'eau selon la relation : $a_w = \text{H.R.E.} \% / 100$

3-2- Traitement des matières premières avant séchage

Le diagramme global de traitement et de préparation des échantillons au séchage est présenté en figure 4.

3-2-1-Tri

Les dimensions des différents échantillons varient dans des intervalles spécifiques à chaque légume et sont présentées au niveau du tableau 3. Le tri des légumes est effectué principalement en fonction de leur calibre. La forme et la couleur ont permis d'écarter les légumes non mûres ou ayant subi une déformation.

◆ Les carottes de forme oblongue ont un poids moyen de $64,0 \pm 17,4$ g par racine. Le nombre des racines mesurés, préparés et utilisés dans l'étude de séchage est de 122 pour une moyenne de 7 racines de carotte par expérience de séchage. Le nombre de séchage réalisé est de 17.

La couleur orangée à rouge brique des carottes s'accompagne parfois de mauve ou de vert sur le collet à cause de l'ensoleillement après défrichage de la terre. Cette partie du légume est éliminée ainsi que les racines fourchues et altérées.

◆ Les courgettes ont un diamètre plus large au milieu du fruit que ses parties pistillaire et pédonculaire. Le diamètre moyen est de $3,8 \pm 0,5$ cm, celui du côté floral (pistillaire) est de

3,7±0,7 cm, avec un poids moyen de 149±52 g par fruit. Le nombre total de courgettes mesurées, préparées et utilisées est de 78 fruits avec une moyenne de 3 par expérience de séchage. Nous avons réalisés 25 essais dans l'étude de séchage de ce légume. La courgette est d'un vert clair avec parfois des taches blanchâtres, elle est dite mouchetée et brillante. Le pédoncule est large avec cinq sections.

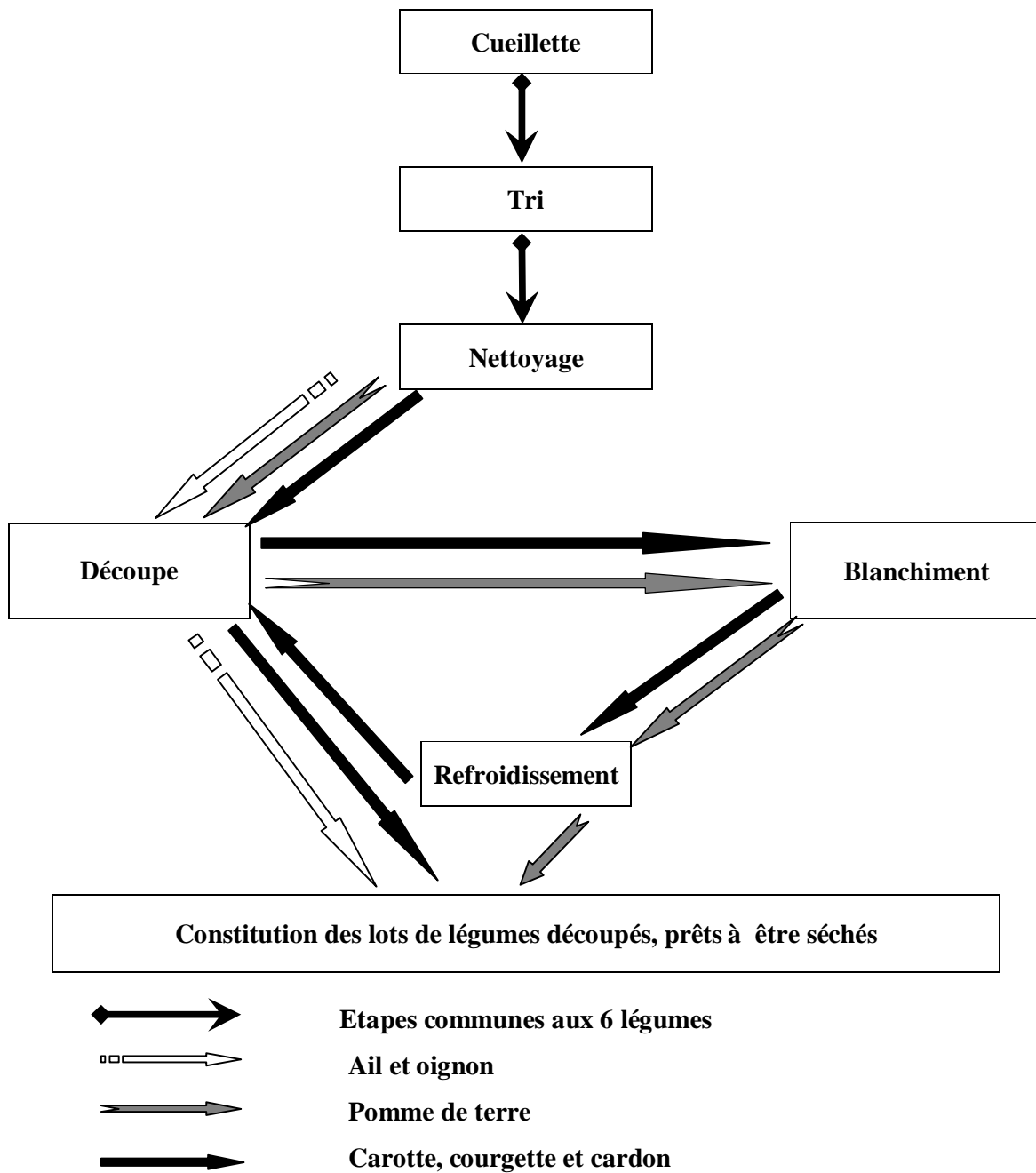


Figure 4 : Diagramme des différentes étapes de traitement des légumes destinés au séchage

♦ Le cardon: La forme de ce légume- tige en côtes larges et pleines à la base et de plus en plus fines vers la partie des feuilles est de couleur vert foncée. Après élimination des parties fines (mois larges auxquelles sont attachées les feuilles) et les épines , seule la partie large des côtes (1,6 à 2,6 cm) avec une longueur de $20,8 \pm 2,9$ cm est récupérée pour l'étude. Le nombre d'essais réalisé pour ce légume est de 33.

♦ Les tubercules de pomme de terre sont de forme oblongue avec des calibres très variés avec une longueur allant de 5,4 à 8,1cm. Cependant le choix est fait de façon homogène pour les différents essais de l'étude, des tubercules dont le diamètre est compris entre 5,2 et 6 cm. 33 essais ont été réalisés dans l'étude de ce légume.

Tableau 3 : Dimensions moyennes avec écarts types des légumes étudiés

Légume	Longueur (cm)	Diamètre*(cm) ou largeur** (cm)			hauteur (cm)
		minimum	médian	maximum	
Carotte* (n=122)	11,9 ±1,2	2,8 ±0,5	3,0±0,4	3,2 ±0,4	-
Courgette*(n=78)	15,5±2,0	3,6±0,6	3,9±0,5	3,9±0,5	-
Pomme de terre* (n=58)	8,2±1,0	-	5,6±0,4	5,6±0,4	-
Oignon* (n=55)	5,8±0,6	-	5,4±0,6	5,4±0,6	-
Cardon** (n=20)	20,8±2,9	-	1,6±0,5	1,9±0,2	0,7±0,2
Ail -caïeux** (n=28) -bulbe* (n=20)	3,2±0,4	-	1,7±0,1	2,2±0,3	2,0 ±0,2
	4,3 ±0,9		4,7±0,4	5,0±0,1	

n : nombre de légumes mesurés

♦ Les bulbes d'ail étudiés ont des dimensions comprises entre $5,1 \pm 0,5$ cm de diamètre global. Après élimination des tiges et de la pelure, les gousses (caïeux) récupérées ont une forme se rapprochant d'un triangle, avec la largeur qui est assimilée à la base, entre 1,6-2,5 cm et une hauteur considérée comprise entre 1,8-2,2 cm. La couleur des caïeux est blanche ivoire avec enveloppe striée de mauve.

♦ L'oignon subit les mêmes opérations d'élimination que l'ail, à savoir découpe des racines et des tiges (collet), enlèvement des enveloppes couvrant le bulbe. La tunique couvrant le bulbe est de couleur rouge violacée et l'intérieur est de couleur blanche striée de mauve.

3-2-2- Nettoyage

L'ail et l'oignon ne nécessitent pas de lavage. Leur nettoyage consiste en l'élimination des enveloppes externes et des racines entourées de terre.

Après tri des échantillons en calibres homogènes, carotte, courgette, cardon et pomme de terre sont brossés et lavés sous l'eau du robinet, pour éliminer les restes de terre ou les poussières adhérent à ces derniers. Ils sont égouttés, puis essuyés pour limiter une éventuelle prise d'eau.

3-2-3- Blanchiment

Le blanchiment est une opération de prétraitement utilisée pour son but essentiel : désactiver les enzymes, contenues dans les légumes qui sont responsables du brunissement enzymatique, et d'assouplir les tissus des légumes permettant ainsi de faciliter leur séchage (MAFART, 1991; BURDEN&WILLS, 1992 et BITON, 1999).

Dans les travaux de séchage des légumes, l'opération de découpe précède le blanchiment. Pour notre cas, nous avons procédé selon les spécificités de chaque légume, soit blanchiment et puis découpe ou l'inverse.

Des six légumes étudiés, l'ail et l'oignon ne subissent pas de blanchiment (BURDEN &WILLS, 1992). Selon CHEFTEL et CHEFTEL (1984), les oignons et l'ail ne sont jamais blanchis avant la déshydratation, compte tenu du départ facile de leurs constituants aromatiques qui risquent de diminuer au cours de l'opération. Le blanchiment des quatre autres légumes est réalisé avant ou après découpe tel que annoncé dans la figure 4 et précisé dans le paragraphe mode de découpe.

Lors des essais préliminaires nous avons découpé les carottes et la courgette en rondelles et le cardon en morceaux et les avons blanchis. Au cours de leur séchage, les premiers ont présenté des points noirs et le dernier s'est manifesté par une couleur brun foncée; signe de brunissement enzymatique apparu après exposition à la température de séchage. Par conséquent, pour éviter et minimiser ce risque, le découpage est effectué après blanchiment dont le rôle est précisément de protéger le légume de ces réactions.

Dans cette étude, le blanchiment à la vapeur est adopté pour traiter nos produits, étant donné son avantage par rapport à l'immersion dans l'eau bouillante. Les produits subissent, moins de perte de substances dissoutes et conservent mieux leur couleur. Cette dernière devient plus prononcée dans le cas de la carotte, la courgette et le cardon.

La pomme de terre est découpée et blanchie pendant des temps différents en fonction de l'épaisseur. Les essais préliminaires ont montré que les tubercules entiers subissaient une pré cuisson en surface aux temps de 8 et 10 min, sans que la température de blanchiment atteigne le cœur du légume.

Nos échantillons, chacun selon son mode de découpe, sont mis dans le compartiment haut d'un couscoussier où arrive la vapeur provenant de l'eau distillée portée à ébullition. Ils sont recouverts partiellement à l'aide d'une planche de cuisine. La température de la vapeur est relevée à l'aide du thermocouple dont la sonde est plongée au milieu du lit des échantillons à blanchir. Les barèmes de blanchiment appliqués pour les quatre légumes sont indiqués dans le tableau 4 suivant:

Tableau 4 : Barème de blanchiment appliqué aux quatre légumes

Légume	nombre d'essais	T °C de la vapeur au niveau légume	Temps de blanchiment (min)	T °C de l'eau de refroidissement
Carotte coupée en deux	12	82± 3	8	12±2
Courgette coupée en deux	17	83 ±2	6	16 ± 2
Cardon pré coupé en tranches de 10 à 12 cm	5	82±2	7	16± 0,5
Pomme de terre: ép. (6,3±0,4mm)	10	92± 3	7	28 ±1
ép. (8,9±0,3mm)			9	
ép. (12,9±0,3mm)			13	

Après blanchiment, les échantillons sont immédiatement refroidis à l'eau courante du robinet pendant 2 à 3 min. La température de l'eau du robinet a varié de 7 à 17 °C au cours des travaux réalisés en hiver et printemps, et de 16 à 28 °C en été.

Après refroidissement, les légumes sont égouttés à l'aide du papier absorbant, pendant une durée de 2 à 3 min.

Des déterminations de la teneur en eau ont été effectuées avant et après blanchiment pour vérifier s'il y'a des variations de teneur en eau lors de ce prétraitement.

3-2-4-Mode de découpe

L'opération de découpe est d'une grande importance dans le séchage; elle permet d'augmenter la surface d'échange et ainsi favoriser l'évaporation de l'eau sans altérations

graves du produit. Dans notre étude la découpe fait partie des paramètres étudiés ,où nous faisons varier l'épaisseur des légumes auxquels nous faisons subir des séchage à des températures variables en vue d'observer le comportement des produits vis-à-vis de la taille des morceaux découpés .

La découpe en morceaux concerne tous les légumes à sécher et intervient avant ou après l'étape de blanchiment tel que montré précédemment par le diagramme (figure 4) qui situe l'intervention de la découpe par rapport aux autres étapes de l'étude des six légumes.

Les légumes sont mesurés à l'aide d'un pied à coulisse, pour déterminer leur dimension moyenne. Les parties extrêmes (côté pédoncule, florale et bouts) sont coupées et jetées.

Pour la découpe de nos échantillons, nous avons utilisé le dispositif à lames parallèles, pour la carotte, pomme de terre et l'oignon, et le guide à spires pour la courgette, l'ail et le cardon. Les tranches de 30-33 mm de ce dernier ont été découpées au couteau sur une planche de cuisine utilisée comme support.

La carotte, le cardon et la pomme de terre sont épluchés à l'aide d'un couteau. La courgette est utilisée telle quelle, sans épluchage.

Les variations des dimensions des morceaux découpés pour l'ensemble des lots mis à sécher en fonction de la température et selon leurs spécificités (figure 5), sont présentées dans le tableau 5.

Tableau 5: Variation des dimensions en cm des morceaux constituant les lots des six produits préparées aux trois température de séchage

légume	85°C	70°C	60°C	***C V moyens%
Carotte*	3,5±0,2	3,3±0,2	3,1±0,06	5,0
Courgette*	3,8±0,3	3,7±0,4	3,6±0,2	8,0
Pomme de terre*	5,6±0,6	6,0±0,7	5,4±0,5	11,0
Oignon*	6,2±0,1	5,5±0,1	5,6±0,04	1,0
Cardon**	ℓ=1,94±0,2/ h=0,71±0,2			29,0 et 11,0
Ail**	ℓ =2,4±0,15/ h=1,7±0,1			7,0

* diamètre des rondelles avec écart type

**ℓ : largeur / h : hauteur (cf.figure 5)

***CV moyens: moyenne des coefficients de variation des différentes mesures des dimensions des morceaux de légumes.

Le mode et sens de découpe réalisés sur nos échantillons dépendent du légume étudié:

La Carotte est épluchée puis découpée en rondelles à trois épaisseurs. Cette dernière est variée en vue d'étudier son effet sur le comportement au séchage. L'outil confectionné pour la

découpe permet d'avoir des rondelles d'épaisseurs ne présentant que très peu de variation (tableau 6).

Selon les prélèvements et la forme de la carotte, les lots utilisés pour le séchage présentent quelques différences de diamètre des rondelles découpées. Afin de minimiser l'hétérogénéité de ces diamètres, un choix a été effectué de manière à obtenir un coefficient de variation réduit. Ce coefficient se trouve compris entre 6,0 % et 7,0 % pour les rondelles à sécher à la température de 85°C et entre 4,0 % et 8,0 % ou inférieur à 3,0 % pour les rondelles séchées à 70 °C et 60 °C respectivement.

Au cours de la découpe, le rapport du diamètre du Xylème sur celui du Phloème (moyenne en %) par des mesures effectuées sur 94 racines de carottes, est réalisée au cours de l'étude aux 3 températures avec les 3 épaisseurs. La détermination de ce rapport permet de nous orienter sur le rapport de ces deux parties importantes du légume et leurs structures cellulaires respectives dont l'intérêt au séchage et réhydratation n'est pas négligeable.

(n=39)	D moy ext. (phloème)	D moy int. (Xylème)	D int. /D ext.
Moyenne	3,00±0,4	1,24±0,2	0,41±0,04
CV %	13,3	16,1	9,7

Dint : diamètre interne (xylème); Dext ; diamètre externe (phloème)(voire figure 5)

Dint/Dext : rapport en pourcentage de la partie cœur (xylème) sur la partie externe (phloème).

Les moyennes des épaisseurs de rondelles découpées, l'écart type avec la moyenne des CV calculés dans chaque mesure sont présentées dans le tableau 6.

La Courgette est coupée en rondelles à trois épaisseurs. Pour ce légume fruit dont la disponibilité a fait défaut, le diamètre a varié de 3,3 à 4,5 cm. Les coefficients de variation du diamètre des rondelles découpées a varié de 6,0 à 13,0 % pour la température de 85°C, de 7,0 à 14,0 % pour 70 °C et de 5,0 à 6,0 % pour 60 °C. Les moyennes des épaisseurs, des écarts types et des Coefficients de Variation calculés dans chaque mesure sont présentées dans le tableau 6.

La Pomme de terre est coupée en rondelles en trois épaisseurs variables avant blanchiment. Le diamètre a varié de 5,4 à 6,2 cm. Celui des rondelles découpées a présenté des coefficients de variation de 11,0 à 12,0 et 10,0 % pour les trois épaisseurs de découpes respectives de 6,3 ;

8,9 et 12,9 mm. La moyenne des épaisseurs de découpe des différents essais est présentée en mm avec l'écart type et le coefficient de variation des mesures dans le tableau 6.

Le Cardon est coupé en segments de côtes de trois longueurs variables. La partie découpée est celle se situant proche du pivot du légume dont les côtes sont plus larges avec un coefficient de variation de 8,0 % pour la largeur et 1,0 % pour la hauteur (épaisseur médiane des côtes) (figure 5). La longueur moyenne des segments découpés en mm avec écart type et coefficient de variation est présentée dans le tableau 6.

L'Ail est coupé transversalement en tranches d'épaisseurs de 5,9 et 7,8 mm. Les extrémités fines sont éliminées avant découpe. La base des caïeux considérée comme largeur a variée de 1,6 à 1,9 cm (figure 5 e). Les tranches découpées et utilisées pour le séchage ont un coefficient de variation compris entre 6,0 et 8,0 %. La moyenne des épaisseurs de découpe des tranches d'ail (mm) avec leur écart type et coefficient de variation (CV) est présentée dans le tableau 6.

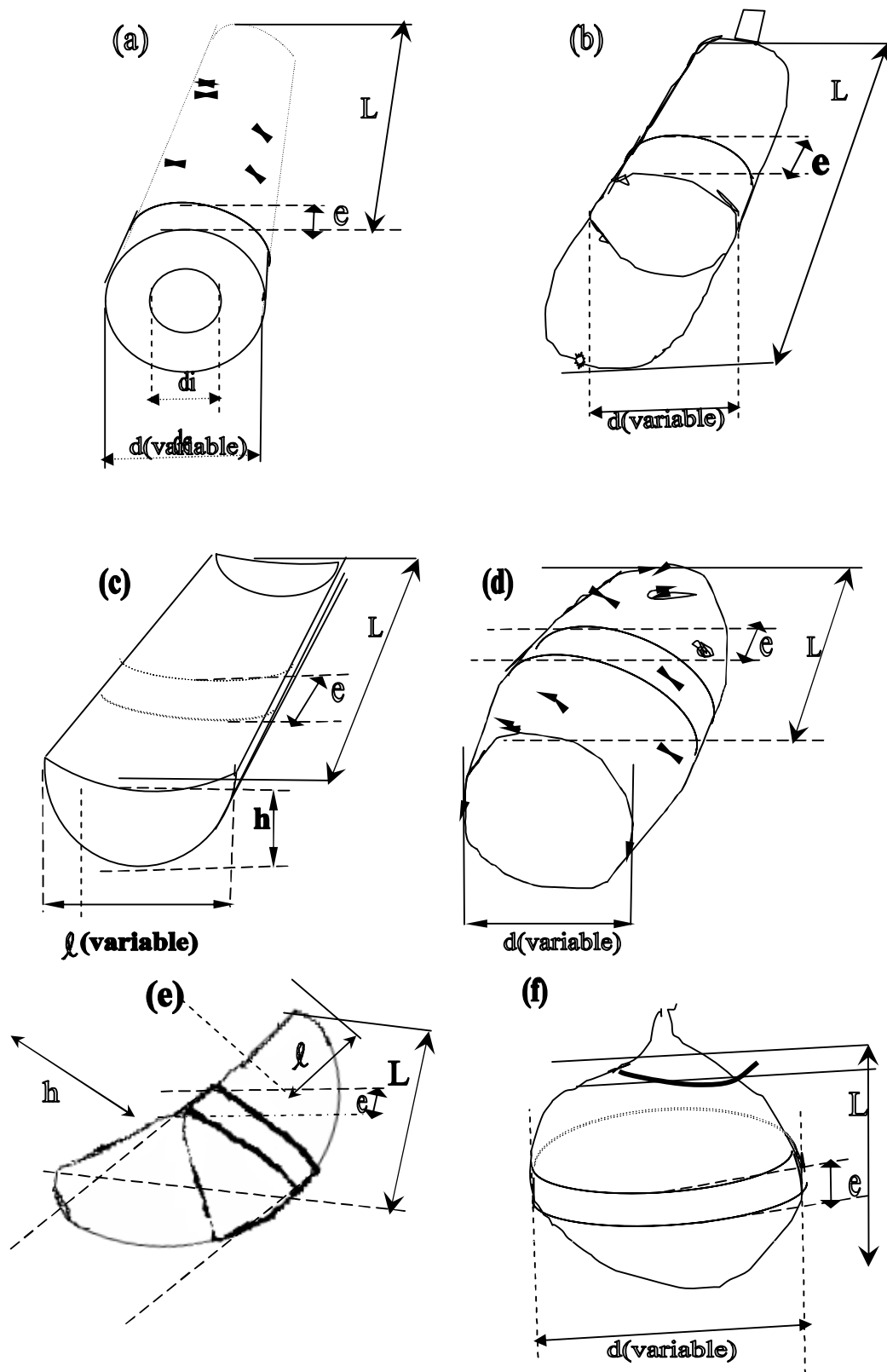
L'Oignon est coupé transversalement en rondelles à deux épaisseurs. Le diamètre des tubercules a varié de 5,4 à 6,3 cm avec un coefficient de variation des rondelles obtenues par la découpe de 10,0 à 3,0 % pour les deux épaisseurs respectives de 6,0 et 8,3mm.

L'épaisseur initiale moyenne de découpe de rondelles avec les écarts types et CV respectifs est présentée dans le tableau 6.

Tableau 6 : Variation des épaisseurs de découpe (en mm) des six légumes avec écarts type et coefficients de variation.

épaisseur de découpe Légume	ép. 1(mm)	CV%	ép. 2(mm)	CV%	ép. 3(mm)	CV%
Carotte	5,8±0,1	5,0	8,7 ±0,3	6,0	12,9±0,3	6,0
Courgette	5,7±0,2	3,0	8,4±0,4	5,0	12,3±0,4	3,0
Pomme de terre	6,3±0,4	6,0	8,9±0,3	4,0	12,9±0,3	3,0
Cardon	5,8±0,6	11,0	8,8±0,6	7,0	32,0±1,2	4,0
Ail	5,9±0,3	5,0	7,8±0,2	3,0	-	-
Oignon	6,0±0,1	1,0	8,3±0,3	4,0	-	-

ép.1, 2, 3 : épaisseurs de découpe dans les intervalles [5,5-6,7],[7,6-9,4]et[11,9-13,2]en mm;
CV : coefficient de variation moyen des mesures de l'épaisseur.



L:longueur; l: largeur ; h:hauteur; e: épaisseur de découpe

Figure 5 : Dimension et mode de découpe des six légumes étudiés: (a) carotte, (b) courgette, (c) cardon, (d) pomme de terre, (e) ail et (f) oignon

3-3- Etude des cinétiques en cours de séchage

3-3-1- Constitution et répartition des lots

Une fois coupés, les échantillons sont pesés et répartis en lots de façon homogène en nombres de morceaux et en masse. Portés par des morceaux de tulle, les rondelles ou tranches sont alignés de façon ordonnée au nombre de trois pour le suivi de la teneur en eau de chacune d'elles, et placées sur des claies dans l'armoire du séchoir à air chaud.

Des lots de six morceaux ont été utilisés pour des raisons pratiques de notre travail, pour les épaisseurs de 5,8 et 5,9 mm de la carotte et l'ail, de même pour le cardon avec l'épaisseur de 5,8 et 8,8mm. Au cours du séchage, les morceaux de petite taille et faible poids, après évaporation et perte de masse, deviennent plus légers et sont alors entraînés par le courant d'air de séchage mélangeant ainsi l'ensemble des lots et gênant le suivi de la cinétique.

Chacun des lots représentant trois essais à la fois pour la simultanéité, est retiré après un temps de séchage de 30 ou 15min et permet après pesée, de chaque morceau (ou deux selon les cas) de suivre l'évolution de la perte de masse du légume, correspondant à l'évaporation de l'eau au cours du temps jusqu'au séchage final à une teneur en eau résiduelle avoisinant 10% sur base sèche. La moyenne des teneurs en eau des morceaux composant un lot représente un point de la cinétique à chaque intervalle de temps.

Un dessiccateur est utilisé pour transporter les échantillons séchés, contenant un produit desséchant (de l'acide sulfurique pur), il permet de maintenir les produits entre une à deux minutes jusqu'à pesée.

La répartition des morceaux d'un lot constituant les trois essais et le nombre de lots par essai en fonction des conditions de travail pour chaque légume sont donnés dans le tableau 7.

Carotte: Les essais réalisés pour l'ensemble des rondelles par épaisseurs et par température sont de 3. Néanmoins les rondelles à épaisseur de 8,7 et 12,9mm ont nécessité chacune 5 essais à 85 °C.

Les coefficients de variation des masses moyennes des rondelles constituant les lots ont varié pour la température de 85 °C de 12,5 à 20,0 %, pour 70 °C de 4,5 ; 15,0 à 25,0 % et pour 60 °C de 1,3 ; 2,5 à 10,6 %.

Courgette: Le nombre d'essais par épaisseurs et par température réalisé est de 5 pour l'ensemble des rondelles étudiées de ce légume. Les coefficients de variation correspondants aux masses moyennes des rondelles ont variés de 8,3 à 11,0 % pour 85 °C, de 8,4 à 16,4 % pour 70 °C et de 15,5 à 25,8 % pour 60 °C.

Tableau 7 : Répartition des lots permettant le suivi du séchage selon les légumes

Légume	épi (mm)	Nombre de lot / essai/température			Nombre de morceaux /lot ***	Masse (g) moyenne par morceau de découpe	Masse moyenne d'1 lot (g)
		85°C	70°C	60°C			
Carotte:	5,8	10*	12	12	6	3,44±1,1	20,6±3,3
	8,7	12**	14	16	3	8,3±0,6	25±1,7
	12,9	14	16	16	3	13,1±1,7	39,2±5,2
Courgette:	5,7	10*	14	14	3	4,7±0,6	14,1±1,7
	8,4	10**	14	14	3	8,3±1,1	24,8±3,4
	12,3	11**	14	16	3	12,6±2,3	38±6,9
Cardon:	5,8	13*	14**	14	6	0,64±0,05	3,8±0,1
	8,8	14*	14**	14	6	0,85±0,04	5,1±0,1
	32,0	14*	14*	14	3	3,2±0,3	9,6±0,8
P. de t:	6,3	12	14	14	3	14,5±0,7	43,6±2,2
	8,9	17**	14	16	3	20,0±1,2	60±3,6
	12,9	18	17	18	3	21,7±2,6	65,0±7,9
Ail:	5,9	14*	17*	18*	6	0,9±0,15	5,4±0,4
	7,8	15*	15	18	3	1,8±0,01	5,4±0,3
Oignon:	6,0	10	10	12	3	16±0,4	48±1,2
	8,3	13*	13	18	3	19,1±0,6	57,3±1,9

*lots retirés à intervalle de temps de 15min du sécheur après la 1^{ère} heure de séchage.

**lots retirés chaque demi-heure puis à partir de 180min de séchage, ils sont retirés chaque 15min pour permettre le suivi de la teneur en eau résiduelle en fin de séchage.

***Le nombre de morceaux égal à 6 représente 2 morceaux fois 3 essais constituant un lot. Un essai est donc représenté par 2 morceaux qui sont pesés ensemble pour une valeur d'un essai parmi trois.

Cardon : le nombre total d'essais réalisés pour ce légume est de 33. Trois essais au minimum ont été réalisés par température et par tranche de découpe. Cependant les tranches découpées à 32 mm ont nécessité 6 essais pour les températures de 85 et 70 °C.

Les coefficients de variations respectifs des masse moyennes par tranches sont compris entre 2,4 et 3,4 % pour celles séchées à 85 °C , 4,2 à 18,8 % pour 70 °C et 0,7 à 7,2 % pour 60 °C.

Pomme de terre: Le nombre total d'essais réalisés pour les trois températures et épaisseurs de découpe est de 33. Les rondelles de 8,9 et 12,9 mm ont nécessité 6 essais à 60 et 85 °C.

Les coefficients de variation des masses moyenne par rondelles sont de 0,6 à 8,4 % pour la température de 85 °C, de 2,1 à 2,9 % pour 70 °C et de 3,4 à 13,0 % pour 60 °C.

Ail: Le nombre d'essais réalisés est de 3 pour chacune des températures de 85 et 70 °C. Cependant à 60 °C il a nécessité 6 essais pour l'épaisseur de 5,9 mm et 9 essais pour celles de 7,8 mm. La masse moyenne des tranches par température et par épaisseur donne un CV compris entre 2,7 et 3,1 % pour la température de 85 °C, 2,1 et 3,7 % pour 70 °C et entre 8,1 et 12,8 % pour 60 °C respectivement pour l'épaisseur 5,9 et 7,8 mm.

Oignon : Le nombre d'essais réalisés pour les deux épaisseurs à 85 et 70 °C est de 3. Quant aux rondelles séchées à 60 °C, 6 essais ont été réalisés pour chacune des épaisseurs.

les CV des masses moyennes des rondelles constituant les lots en fonction de la température et de l'épaisseur sont de 2,2 à 2,3 % pour 85 °C, de 0,9 à 4,5 % pour 70 °C et de 1,4 à 6,0 % pour 60 °C respectivement pour l'épaisseur 6,0 et 8,3 mm.

Les lots d'échantillons pesés sont introduits dans le sécheur qui est préalablement chauffé et réglé à la température fixée, soit 85 ; 70 ou 60 °C.

La masse de chargement (introduite) dans le séchoir varie, en fonction de la forme de découpe des légumes, de leur disponibilité, de la taille et poids de chacun des morceaux.

3-3-2- Obtention des tracés de cinétiques de séchage

La moyenne des rondelles ou tranches par lot constituent un point de la courbe de la teneur en eau résiduelle sur base sèche, calculée au temps t . Le suivi de l'évolution du séchage des denrées est réalisé par pesée de chaque morceau (ou deux à la fois) de chaque lot à des intervalles de temps de 30 min (ou de 15min) dès la sortie du sécheur.

De chaque lot retiré du séchoir, la moyenne des pesées permet par différence de déterminer la perte de masse, et de calculer : la masse d'eau évaporée, la masse d'eau résiduelle, les teneurs en eau du produit par rapport à la masse humide et à la matière sèche du produit séché atteinte à ce moment.

Une fois le séchage terminé, les morceaux dont les teneurs en eau résiduelles sont voisines et inférieures à 10% sur base sèche sont conditionnées dans des sachets en polyéthylène (cellophane) thermo soudés et conservés à la température ambiante, en vue de les utiliser lors des tests de réhydratation et de la mesure de l'activité de l'eau.

A partir des séries de valeurs moyennes des humidités sur base sèche évoluant au cours du séchage, les tracés exprimant la cinétique de séchage sont obtenus.

A partir de tableaux représentant la moyenne des teneurs en eau sur base sèche des différents essais selon la température et l'épaisseur des morceaux. Des courbes obtenues de trois essais par paramètre étudié, une courbe moyenne $X = f(t)$ est déduite et puis manuellement lissée. Le rapport $-dX/dt$, terme principal qui exprime la vitesse de séchage est déterminé graphiquement à partir de la courbe lissée pour des intervalles de temps dt courts de 10 minutes. Les courbes de cinétique de teneur en eau moyenne en fonction du temps ;

$X_m = f(t)$, de vitesse de séchage en fonction du temps $-dX/dt = f(t)$ et en fonction de la teneur en eau moyenne $-dX/dt = f(X_m)$ sont tracées.

3-3-3- Appréciation de la qualité des denrées au cours du séchage

3-3-3-1- Evolution de la forme et des dimensions

Pour le suivi de l'évolution des légumes au cours du séchage, des mesures des dimensions des échantillons sont effectuées à des Δt de 30 min. La taille (épaisseur, diamètre) des légumes étudiés en fonction de la teneur en eau et du temps est représentée par le taux de rétrécissement qui est exprimé par : **$(\text{épf} / \text{épi}) \times 100$ et $(\text{df} / \text{di}) \times 100$**

Les résultats des mesures de l'évolution de l'épaisseur et ceux des diamètres sont transformés en taux de rétraction, montrant ainsi la perte de la taille (la variation de la dimension) des morceaux au cours du séchage.

Le taux de rétraction est exprimé comme suit :

$$\text{Tr \%} = (\text{épi} - \text{épf} / \text{épi}) \times 100 \quad \text{et} \quad \text{Tr \%} = (\text{di} - \text{df} / \text{di}) \times 100$$

épi : épaisseur initiale de découpe

épf: épaisseur finale après séchage

di: diamètre initiale des rondelles

df: diamètre final des rondelles après séchage

Nous avons volontairement exprimé cette évolution en taux de rétraction qui est différente de ce qui est considéré comme taux de rétrécissement, dans le but de montrer la variation de la taille par rapport à l'état initial du légume et permettre de comparer les effets des paramètres (température et épaisseur de découpe).

La moyenne de la variation de trois essais avec l'écart type relatif au temps t de toutes les mesures permettront de montrer la répétabilité et le comportement de chaque essai par rapport à l'autre, en fonction de la nature du légume, et des modes de découpe.

3-3-3-2- Evolution de la couleur

Des observations sur le changement d'état des morceaux, sont notées à chaque intervalle de temps dans le but d'étudier le changement d'aspect en fonction de la température et de l'épaisseur.

Des prises de vues (photos), serviront à montrer certaines des modifications au niveau des morceaux séchés.

3-3-4- Appréciation de l'aptitude des légumes à la réhydratation

Pour montrer les conséquences du séchage sur les légumes, des tests de réhydratation sont réalisés. Le suivi de l'évolution du comportement des six produits est enregistré à l'aide de prises de vues (appareil photo numérique de marque HP Photo Smart 215, de résolution 1.3 MP (méga pixels)).

Il s'agit de tester la réabsorption d'eau par les produits séchés en vue d'apprécier leur aptitude à la réhydratation lors d'utilisations ultérieures.

Les morceaux de légumes séchés étant conservés dans des sachets en cellophane et thermo soudés pendant 15 jours à 5 mois (en fonction de la saison de récolte et disponibilité du légume, au moment de la réalisation du test).

Les morceaux sont introduits dans des boîtes de Pétri contenant de l'eau distillée à température ambiante (25-29 °C), et laissés s'imbiber (volumes d'eau de 15, 20 et 25 ml respectivement pour les 3 dimensions de découpe). Des pesées sont réalisées à des intervalles de temps réguliers de 30 min, pendant 6 heures. Avant chaque pesée le produit est égoutté et tamponné dans du papier absorbant pour éliminer l'excès d'eau.

Les résultats sont exprimés en taux de réhydratation par le rapport de la teneur en eau de réhydratation $X_{réh}$ en g d'eau/g de masse sèche sur la teneur en eau initiale X_i sur base sèche avant séchage, qui a permis d'obtenir la teneur en eau résiduelle finale du légume séché.

Connaissant la masse du produit testé et sa teneur en eau finale de masse sèche, la teneur en eau initiale du produit avant séchage et la masse d'eau absorbée rapportée à la masse sèche;

les calculs pour exprimer le taux de réhydratation en fonction de la masse d'eau réabsorbée sont somme suit:

$$\Delta m = m_3 - m_2 \quad \text{masse (en g) d'eau réabsorbée}$$

Le taux de réabsorption par rapport à la quantité d'eau initialement présente (l'état d'origine) dans le produit frais est exprimé par :

$X_{r\acute{e}h} = X_2 + \Delta X_t$ teneur en eau de réhydratation exprimée en g d'eau absorbée par g de masse sèche du légume, calculée après chaque pesée jusqu'à $X_{r\acute{e}h}$.

$$[X_{r\acute{e}h} / X_1 \times 100] \quad \text{en \% de g d'eau absorbée par 100 g d'eau initiale du légume.}$$

où m_3 : masse d'eau absorbée au cours de la réhydratation en g

m_2 : masse initiale du légume sec avant réhydratation en g

X_1 : teneur en eau initiale à partir de laquelle les teneurs en eau résiduelles des cinétiques de séchage des légumes ont été calculées en g d'eau/g de masse sèche

X_2 : teneur en eau finale du légume sec en g d'eau/g de masse sèche

$X_{r\acute{e}h}$: teneur en eau après réhydratation du légume séché au cours du temps en g d'eau par g de masse sèche.

ΔX_t : teneur en eau sur base sèche au cours de la réhydratation au temps t, en g d'eau par g de masse sèche

Les valeurs obtenues au cours du test permettent de tracer des courbes de cinétique de réhydratation des différents légumes en fonction de l'épaisseur et la température de séchage, avec des prises de vues au temps initial t_0 , à 3 et 6h. Les courbes expriment le taux de réhydratation $X_{r\acute{e}h}$ après réhydratation par rapport à la teneur en eau initiale X_i du légume en fonction du temps.

Des courbes de comparaison sont présentées en fonction de la température et l'épaisseur de chaque légume et leurs effets sur le taux de réhydratation.

3-3-5- Séchage solaire

Le sécheur est exposé le matin pendant 2 heures, jusqu'à une température interne dépassant les 50°C en fonction des journées et de l'ensoleillement. Nous avons atteint 72°C aux environs de midi par temps ensoleillé.

Les échantillons de légumes testés par le sécheur solaire sont: la pomme de terre, l'ail et l'oignon.

La matière première est préparée comme pour le séchage à convection par air chaud et découpée dans les mêmes dimensions. Pour le suivi de la cinétique de séchage, trois (3)

morceaux de chaque épaisseur par denrée sont pesés et introduits dans le tiroir du bas de la chambre de séchage. Ils sont maintenus entre 4 à 5 heures par journée. Le soir les morceaux sont récupérés et maintenus dans un dessiccateur jusqu'au jour suivant pour être remis au séchage et ainsi de suite pendant 3 à 4 jours, jusqu'à une teneur en eau résiduelle sur base sèche inférieure à 10%.

Le tracé des courbes est obtenu par la moyenne des pertes de masse de chaque morceau qui constitue un point de la cinétique. La même procédure, que dans le séchage à air chaud, est effectuée pour l'obtention du terme de la vitesse de séchage et le tracé des courbes.

B/ Résultats et Discussions

1/ Richesse en eau des légumes à déshydrater

Les produits frais sont suffisamment humides, contenant jusqu'à 95% d'eau, permettant d'entretenir l'activité enzymatique et la croissance des microorganismes. Le seuil critique d'humidité pour la préservation des denrées, est d'environ 10 à 15 % sur base humide selon BURDEN&WILLS (1992) .A partir de cela nous avons ciblé les taux d'humidité inférieur à 13% jusqu'à une valeur 3% pour considérer nos échantillons comme séchés, en fonction de chaque résultat obtenu.

Les moyennes des teneurs en eau initiale des six légumes étudiés sont présentées dans le tableau 8.

Tableau 8 a : Moyennes d'humidité initiale des six légumes en g/100 g de matière humide et en g/g de masse sèche

légume mesure	carotte	courgette	cardon	ail	oignon	pomme de terre
n/ n*	5 / 1	8 / 2	3 / 2	4 / 4	5 / 4	5 / 2
xi b.h	93,3±0,2	94,1±0,6	93,7±0,5	65,3±1,3	89,3±0,9	79,1±2,0
Xi b.s	13.9±0,0	14,7±0,98	15,5±0,9	1,88±0,11	8,52±0,93	3,52±0,17

n : nombre de mesure réalisé par légume/n*:nombre de valeurs d'humidités utilisées pour le suivi des cinétiques.

Remarque: des valeurs de teneur en eau sont obtenues pour un même lot de matière première avec la moyenne des humidités déterminées en deux ou trois jours successifs et elles ont été utilisés dans le calcul du suivi de la cinétique de séchage.

Nous notons la teneur en eau légèrement élevée de la carotte étudiée qui est en moyenne de 93,3±0,2 avec un coefficient de variation de 0,3 %, par rapport à ce qui est rapporté dans la littérature (87,5-92,1 % ou g/100g selon SOUCI et coll., 1994 ; FAVIER et coll., 1995). MERGNAT et coll. (1994) rapportent un taux de matière sèche de 12 %. Ceci est probablement du à la période de la récolte de nos échantillons en hiver. La carotte se prête bien à la préparation et à l'homogénéisation lors de la mesure de la teneur en eau, malgré l'étalement dans le temps des prélèvements, la variation est acceptable.

Les teneurs en eau de la courgette se situent dans un intervalle de 93,2 à 94,7 %, en moyenne 94,1±0,6 avec un coefficient de variation de 0,6 %, supérieurs à 92,2 % rapporté par SOUCI et coll. (1994) mais en conformité avec les valeurs de 94 et 94,5 % rapportés par FAVIER et coll. (1995) et ERARD (2002). MERGNAT et coll. (1994) ont obtenu un taux de matière sèche de 5,2 %. Ce légume fruit n'a pas posé pas de problème d'homogénéisation lors des

mesures de la teneur en eau au vu de son coefficient de variation qui est acceptable malgré que les prélèvements aient été réalisés au cours de deux saisons (hiver et fin printemps).

La pomme de terre étudiée a une teneur en eau moyenne de $79,1 \pm 2,0$ % avec un coefficient de variation élevé par rapport aux autres légumes qui est de 2,6 %, se trouve dans l'intervalle rapporté par la littérature qui est compris entre 77,8 et 81,8 % selon SOUCI et coll. (1994) et FAVIER et coll. (1995). Ce légume se prête bien à l'homogénéisation, cependant la variation des teneurs en eau de 2 % est probablement due au prélèvement au champs, où le premier lot est cueilli à un niveau moins profond au sol que le second lot.

La teneur en eau moyenne de l'ail est de $65,3 \pm 1,3$ %, légèrement élevée par rapport à celle de la littérature, avec un coefficient de variation, aussi élevée que celui de la pomme de terre, de 2 %. Celles des deux derniers lots de 64,4 et 63,7 % sont en conformité avec ceux de la bibliographie qui sont de 63,7-64,6 % selon SOUCI et coll. (1994) ; FAVIER et coll. (1995). Les variations obtenues pour les mesures de l'ail sont dues au fait que les premiers échantillons sont ramenés avec les tiges et feuilles encore vertes, ils sont plus riches en eau, puis diminution de la teneur en eau dans les derniers lots dont les tiges, le collet, et la tunique sont asséchées.

Lors des déterminations des teneurs en eau, nous avons rencontré des difficultés dans l'homogénéisation de deux légumes, le cardon et l'oignon.

Pour le cardon, légume riche en fibres et en eau, il n'était pas possible de le râper, donc nous l'avons découpé en petits morceaux de la taille de 2 à 3 mm. Les teneurs en eau obtenues sont de 93,1 à 94,5 % se situant dans l'intervalle des valeurs rapportée par la bibliographie qui sont de 92 à 94 % selon CHAUX et FOURY (1994), et FAVIER et coll. (1995). La teneur en eau moyenne est de $93,8 \pm 0,6$ % avec un coefficient de variation de 0,64 %.

Quand à l'oignon, riche en aromates, au cours du râpage, il libère beaucoup de jus et éventuellement des substances aromatiques qui se sont échappées. Les teneurs en eau obtenues sont de 87,9 à 89,6 %. Ces valeurs ont une moyenne de $89,3 \pm 0,9$ % avec un coefficient de variation de 1,0 %, se situent dans l'intervalle rapporté par SOUCI et coll. (1994) qui est de 86-89 % et de FAVIER et coll. (1995) qui rapportent la valeur de 89 %.

Pour chaque légume, trois essais au moins ont été réalisés pour assurer une répétabilité acceptable avec des déterminations réalisées après blanchiment pour trois des quatre légumes ayant subi ce prétraitement, la courgette, le cardon et la pomme de terre dont les valeurs moyennes sont présentées dans le tableau 8 b.

Tableau 8 b : Variation de la mesure de la teneur en eau avant et après blanchiment de la courgette, cardon et pomme de terre:

	courgette (n=3)	cardon (n=1)	Pomme de terre (n=2)
avant blanchiment	94,57	93,15	79,47
après blanchiment	94,28	94,25	78,96
moyenne	94,4±0,2	93,7±0,5	79,2±0,3
C V%	0,2	0,5	0,4

n : nombre de mesure réalisé après blanchiment

La courgette est le légume pour lequel nous avons réalisé le plus de détermination de teneur en eau avant et après blanchiment. La variation présente un écart type de 0,2 avec un coefficient de variation de 0,2 %. Cette variation est considérée comme faible par rapport à sa forte teneur en eau et n'influe pas sur la conduite du séchage avec l'une ou l'autre des deux valeurs obtenues.

Le cardon a présenté un écart type de 0,5 avec un coefficient de variation de 0,5 % qui est légèrement élevé par rapport à celui de la courgette. Cependant la valeur obtenue après blanchiment est utilisée pour le suivi des pertes de masse et évolutions de la teneur en eau lors du séchage et qui est de 93,6 et 94,25 %.

La pomme de terre a présenté un écart type de 0,3 avec un coefficient de variation de 0,38 % seulement lors des mesures de la teneur en eau avant et après blanchiment. La moyenne entre deux mesures, obtenue est de 77,0 et 78,69 % et utilisées pour le suivi de la cinétique de séchage.

2/ Séchage et comportement de la carotte

2-1- Résultats expérimentaux et expression en vitesse de séchage

Les résultats des courbes de séchage ont été obtenus à partir, de trois essais pour chaque température et chaque épaisseur de découpe. L'allure de séchage peut être obtenue à partir d'une courbe « lissée » (BIMBENET, 1984). Nous avons exprimé les cinétiques en teneurs en eau X (g d'eau/g de masse sèche) en fonction du temps, et les vitesses de séchage $-dX/dt$ (g d'eau évaporée/g de masse sèche/heure) en fonction du temps et de la teneur en eau sur base sèche.

Le tableau 9 est donné comme exemple de résultats des teneurs en eau sur base sèche des trois essais pour l'épaisseur $5,8\pm 0,1$ mm à 60°C exprimées après conversion de la variation de la masse au cours du temps.

Tableau 9 : Résultats expérimentaux de la cinétique de séchage de la carotte à 60°C, épaisseur 5,8±0,1 mm (xi=93,3% sur b.h)

Temps en min	X (g/g m.s) essai1	X (g/g m.s) essai2	X (g/g m.s) essai3	moyenne des 3 essais
ti=0	13,900	13,900	13,900	13,900 ± 0,00
30	7,560	7,880	8,550	7,997 ± 0,41
60	3,470	4,000	5,000	4,157 ± 0,63
90	1,650	1,615	1,500	1,588 ± 0,06
120	0,790	0,546	0,780	0,705 ± 0,11
150	0,290	0,460	0,464	0,405 ± 0,08
180	0,212	0,235	0,338	0,287 ± 0,05
210	0,154	0,136	0,155	0,148 ± 0,01
240	0,096	0,050	0,134	0,093 ± 0,04
270	0,068	0,083	0,125	0,092 ± 0,02
300	0,090	0,056	0,112	0,086 ± 0,02
330	0,039	0,024	0,094	0,052 ± 0,03

La variation de l'humidité moyenne sur base sèche de 13,9 à 0,052 (de 93,3 à 4,9 % sur base humide) au cours du séchage est représentée en figure 1a, puis lissée manuellement afin de permettre de déduire la variation de la vitesse de séchage.

Notre produit considéré comme un solide ayant une masse sèche m_s et à un instant t contient une masse d'eau m_e correspondant à une teneur en eau X .

La variation $-dX/dt$ équivaut à $-dm/dt$ et exprime le terme principal de l'équation donnant la vitesse de séchage.

Ces dernières exprimeront le comportement au cours de la déshydratation, par la vitesse d'évaporation en fonction de la température et de la dimension de découpe du légume mis à sécher. Dans le tableau 10 sont réunies les valeurs obtenues.

Tableau 10 : Résultats du découpage de la courbe lissée : cas de la carotte à 60 °C (épaisseur 5,8 mm) (xi=93,3% sur b.h).

tps (min)	X (g/g b.s)	dX	Xm (g/g b.s)	tm (min)	-dX/dt (g/g m .s/h)
0	13,90				
10	11,75	2,15	<u>12,83</u>	<u>5</u>	<u>12,90</u>
20	9,80	1,95	10,78	15	11,70
30	8,02	1,78	8,91	25	10,68
...
60	4,000	1,12	<u>4,56</u>	<u>55</u>	<u>6,720</u>
...
120	0,70	0,19	0,79	115	1,11
...
250	0,096	0,004	<u>0,098</u>	<u>245</u>	<u>0,024</u>
...
330	0,052	0,008	<u>0,056</u>	<u>325</u>	<u>0,048</u>

tps : temps de séchage (min)(33 points); **tr** : temps réel expérimental (min)(12 point)
X (g/g b.s) ; Teneur en eau du légume sur base sèche (g/g b.s) ou de masse sèche (g/g m.s)
dX : est la variation de la teneur en eau dans un intervalle de temps $dt = 10$ min ;
X_m (g/g b.s) : teneur en eau moyenne obtenue entre deux valeurs de X et lue par projection du point d'intersection de la médiane d'un dt . X_{m1} correspond au temps dt moyen de 5 min.
t_m : est le temps moyen t_m (min) du dt entre deux points de dX ;
-dX/dt (g/g m.s/h) : représente la vitesse de séchage du légume; exprimée en gramme d'eau évaporé par gramme de masse sèche et par heure de temps de séchage (g/g m.s/h).

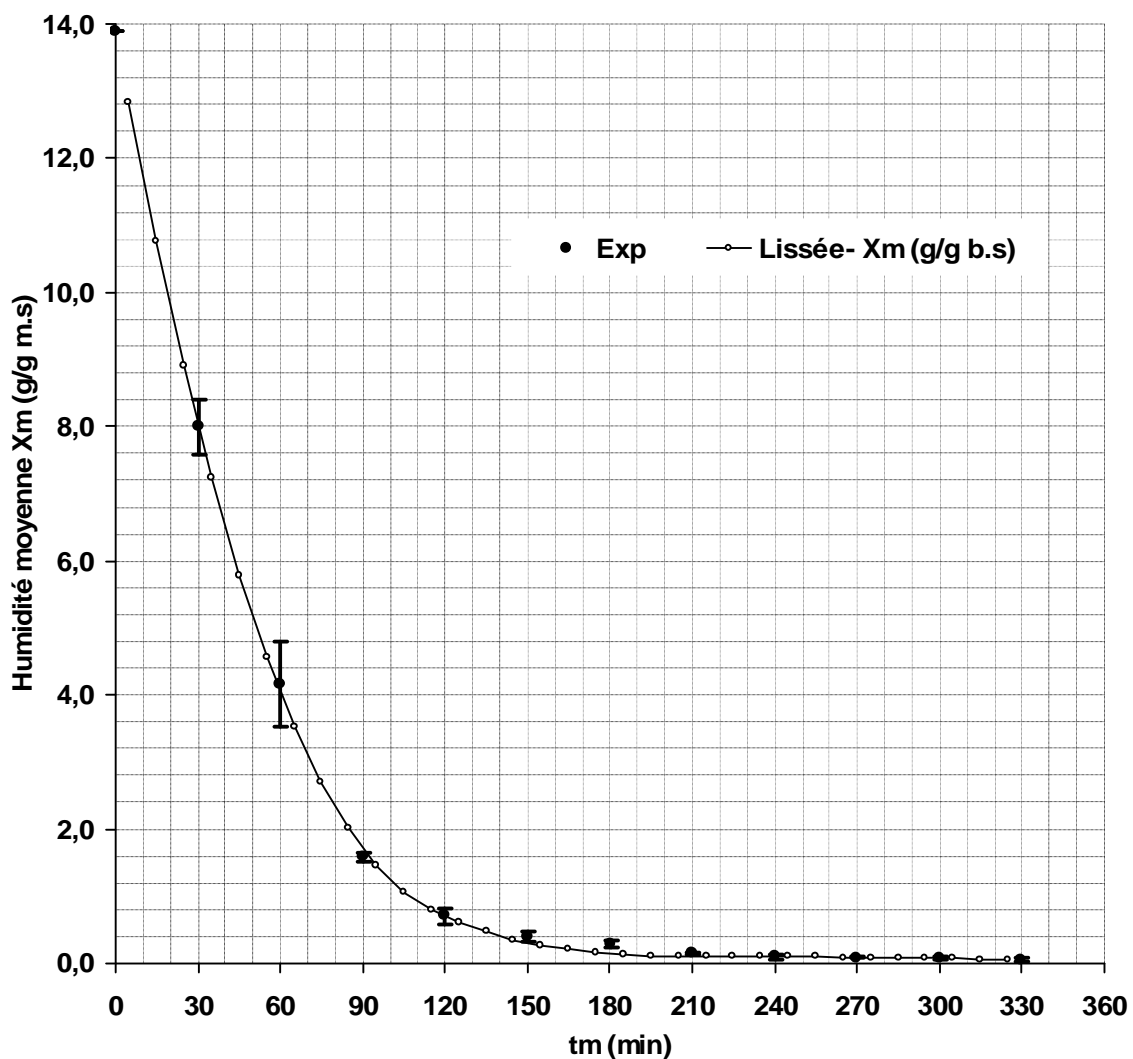


Figure 1a : Courbe de séchage expérimentale avec lissage de rondelles de carotte à 60 °C, 5,8 mm d'épaisseur ; X_m=f(t_m)

La courbe de cinétique de séchage présentée dans la figure 1b, montre l'évolution de la teneur en eau moyenne X_m (g/g b.s) en fonction du temps moyen t_m (min).

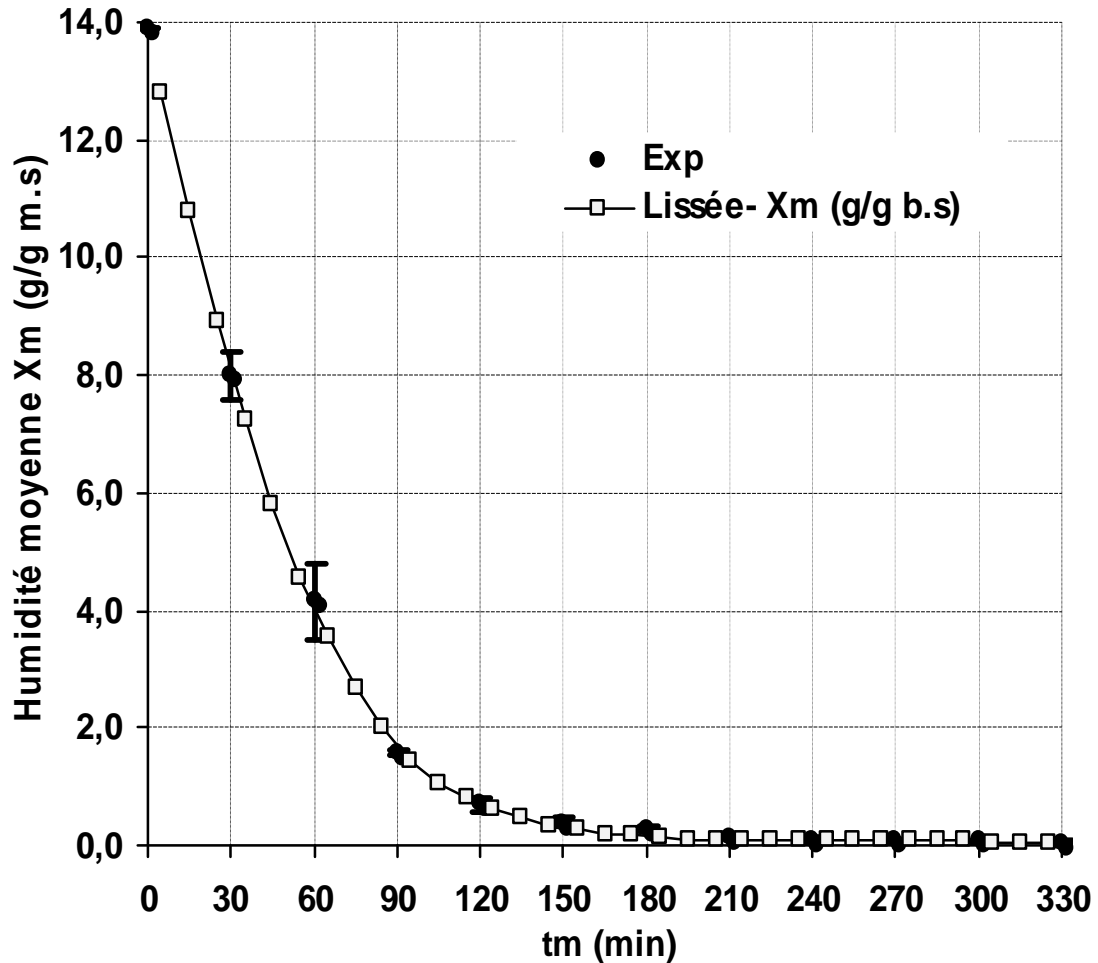


Figure 1b : Courbe du séchage de rondelles de carotte à 60 °C, 5,8 mm d'épaisseur ; $X_m=f(t_m)$

2-2- Cinétique de séchage

2-2-1-Présentation de l'allure générale de la courbe de cinétique

La figure 2 (séchage de rondelles de carotte à 60 °C, épi 5,8 mm) représente les courbes de vitesse de séchage en fonction du temps moyen t_m et en fonction de la teneur en eau moyenne X_m . Elle permet au moyen des variations, de temps (Δt_m) et de teneur en eau (ΔX_m) de décrire et commenter les courbes de séchage du légume.

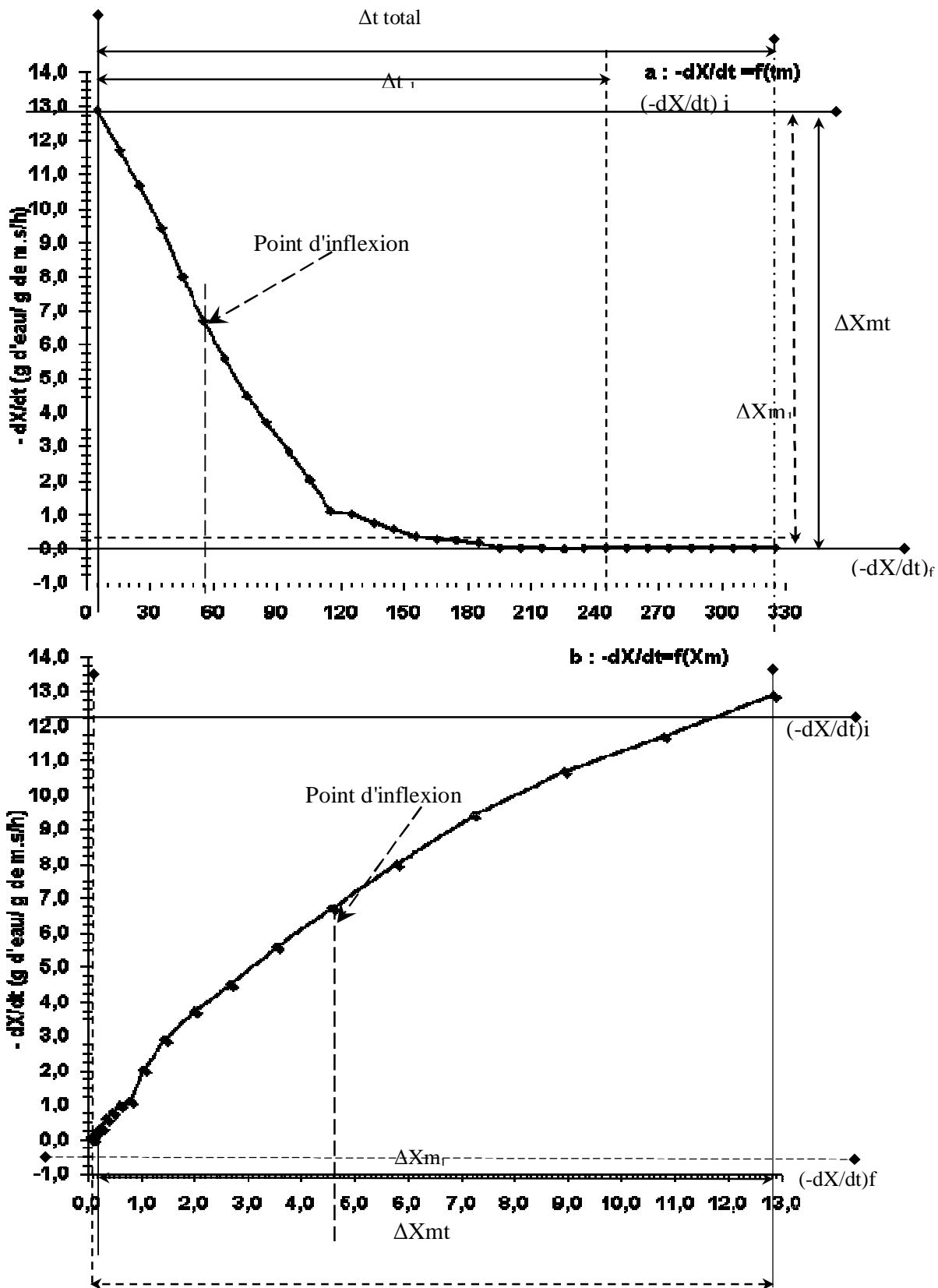


Figure 2 : Représentation des cinétiques de séchage après déduction de $-dX_m/dt$ (a) en fonction de (t_m) et (b) en fonction de (X_m)

Δt_f : temps de séchage allant de la mise en séchoir jusqu'au moment où la teneur en eau finale moyenne (X_{mf}) est atteinte, il est de 5h 25min et correspond à ΔX_{m_f} .

Δt_1 : temps de séchage allant de la mise en séchoir jusqu'au moment où la teneur en eau atteinte est immédiatement inférieure à 10 % sur base sèche; il est de 4h05min et correspond à ΔX_{m_1} .

ΔX_{m_1} : Variation de la teneur en eau moyenne à partir de X_m initiale (au $t_m=5$ min) jusqu'à la teneur en eau moyenne de séchage ciblée, inférieure à 10 % sur base sèche. Cette variation est de 12,73 g/g m.s soit 92,72 % sur base humide.

ΔX_{m_t} : Variation de la teneur en eau moyenne à partir de X_m initiale (au $t_m=5$ min) jusqu'à la teneur en eau X_{m_f} , correspond à 12,77 g/g b.s soit 92,74% sur b.h.

$(-dX/dt)_i$: Vitesse de séchage initiale au temps $t_m=5$ min qui est de 12,9 g d'eau/g de m.s/h et correspond à $X_{m_i}=12,83$ b.s (92,77 % b.h).

$(-dX/dt)_1$: Vitesse de séchage au moment où X_m est inférieure à 10 % sur base sèche est atteinte, elle est de 0,024g/g m.s/h et correspond à $X_{m_1}=0,098$ b.s (8,9 % b.h).

$(-dX/dt)_f$: Vitesse de séchage finale où la teneur en eau X_{m_f} est atteinte au t_{m_f} , qui est de 0,048 g/g m.s/h et correspond à $X_{m_f}=0,056$ g/g b.s (5,3 % b.h)

Point d'inflexion: point représentant le changement de pente de la courbe, correspond au t_m de 55min, à $X_m=4,56$ b.s (82,01 % b.h) et à la vitesse $dX/dt = 6,72$ g d'eau/g de m.s/h.

Le temps mis pour atteindre la teneur en eau ciblée (<10 % b.s) ,la quantité d'eau évaporée ainsi que l'évolution de la vitesse avec laquelle celle-ci quitte la matrice du légume sont les éléments essentiels sur lesquels est basée l'interprétation et la comparaison de la cinétique de séchage des légumes étudiées. L'allure générale des courbes montre, les changements de courbures permettent de situer les points d'inflexions ainsi que la subdivision des phases de séchage, qui reflètent les types de liaisons d'eau existant dans les légumes

NINDO et coll. (2003), ont déterminé la fin du séchage des asperges quand le contenu en humidité est arrivé à une valeur inférieure à 0,1 sur base sèche. Cela nous permet de situer le niveau de teneur en eau pour considérer les légumes comme séchés à $X_{m_1} \leq 0,1$ b.s.

2-2-2-Effet de la température sur la cinétique et la vitesse de séchage

Le résultat de l'effet de la température de séchage sur la cinétique des vitesses de séchage des différents légumes est exprimé par des courbes, montrant l'influence de ce paramètre sur le comportement de chaque produit en fonction de sa dimension.

Les figures 3 (b et c), 4 (a, b et c) et 5 (a, b et c) représentent l'évolution de la cinétique ($X_m=f(t_m)$) et de la vitesse de séchage (dX/dt en fonction de t_m et en fonction de X_m) de la carotte et montrent l'effet de chaque température de séchage (60 ; 70 et 85°C) sur chacune des trois épaisseurs de rondelles de carotte ($5,8\pm 0,1$; $8,7\pm 0,3$ et $12,9\pm 0,3$ mm).

A partir des résultats des valeurs de t_m , X_m et $-dX/dt$ (similaires au tableau 10), le tableau 11 (voir annexe 2) est dressé pour montrer les variations de temps, de teneurs en eau et de vitesse de séchage.

L'allure générale des courbes de cinétique (figures 4a et 5a) montre que le séchage se déroule en phase décroissante sans la présence de phase de mise en température ni la phase constante.

►► Sur les figures 3b et 3c de l'épaisseur 5,8mm, les courbes démarrent au temps initial ($t_{mi} = 5$ min) avec des vitesses initiales $(-dX/dt)_i$ de séchage différentes où celle de 85 °C est la plus élevée avec 16,92 g d'eau/g m.s/ h correspondant à une teneur en eau initiale X_{mi} de 12,49 g/g b.s (92,59 % b.h), suivie par celle de 70 °C avec 13,2g d'eau/g m.s/h et une X_{mi} de 12,8 g/g b.s (92,75 % b.h) et enfin la température 60 °C a la plus faible vitesse initiale de 12,9 g/g m.s/h correspondant à X_{mi} de 12,83 g/g b.s (92,77 % b.h).

Au cours du séchage les courbes de 70 °C et de 60 °C se confondent avec des écart types qui se chevauchent dès le début du séchage où l'effet de la température s'atténue jusqu'au point de X_m respectif de 7,21 et 7,24 g/g b.s (87,82 et 87,86 % b.h) correspondant au t_m de 35min à la vitesse de 9,72 et 9,42 g/g m.s/h. Après ce point les deux courbes évoluent séparément où l'effet de la température est apparent jusqu'aux basses teneurs en eau résiduelles où elles se confondent de nouveau jusqu'à la fin du séchage. La courbe de 85°C évolue séparée des deux autres jusqu'à la teneur de $X_m < 0,4$ b.s (<28,6 % b.h) où elle se confond avec celle de 70 et 60 °C.

► La courbe de séchage à 60°C, montre qu'à Δt_1 4h 05min (245 min), les rondelles atteignent la teneur en eau moyenne sur base sèche <10 g/g b.s, $X_{m1}=0.098$ g/g b.s (8,9 % sur b.h). Cette durée a été suffisante pour éliminer ΔX_{m1} de 12,73 g d'eau /g de masse sèche soit 92,72 % sur base humide de la totalité de l'eau contenue dans la carotte. La teneur en eau moyenne finale est atteinte après 1 h 20min (80 min) de plus pour éliminer 4,2 % b.s (4,03 % b.h) d'eau restante de X_{m1} jusqu'à $X_{mf}=0,056$ g/g b.s (5,3 % b.h). Le temps Δt_t de 5h 25min (325 min) correspond à l'évaporation de ΔX_{mt} 12,77 g d'eau /g de m.s soit 92,74 % b.h (g d'eau évaporée par 100 g de masse humide) au cours du séchage de ces rondelles de carotte.

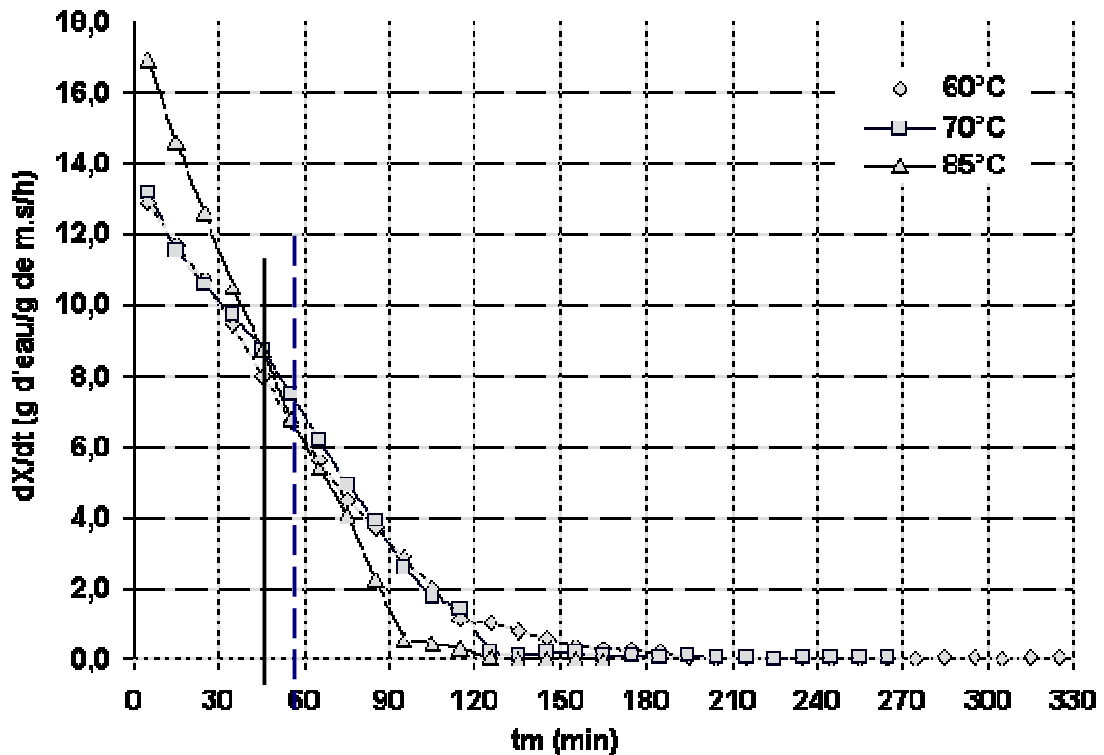


Figure 3b : Effet de la température sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte de 5,8 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(tm)$

► La courbe de séchage à 70°C, montre qu'à Δt_1 3h 05min (185min) les rondelles atteignent la teneur en eau $X_{m1}=0,091$ b.s (8,3 % b.h) avec une évaporation de ΔX_{m1} de 12,71 g/g b.s (92,7 % b.h) .La teneur en eau moyenne finale X_{mf} de 0,036 g/g b.s (3,47 % b.h) est atteinte après 1h20min (80min) de plus pour évaporer 5,5% b.s (5,2% b.h). Le temps Δt de 4h25min (265min) a permis une évaporation de ΔX_{mt} de 12,76 g/g b.s soit 92,73 % b.h (g d'eau évaporée par 100 g de masse humide) au cours du séchage de ces rondelles de carotte de 5,8 mm d'épaisseur.

La courbe de séchage à 85°C, montre que la teneur en eau ciblée est atteinte après Δt_1 de 1h 45min (115 min) de séchage seulement avec $X_{m1}=0,098$ g/g b.s (8,9 % b.h) et l'évaporation de $\Delta X_{m1}=12,39$ g/g b.s soit 92,53 % sur base humide. La teneur en eau X_{mf} de 0,054 g/g b.s (5,1 % b.h) est atteinte avec une durée supplémentaire de 50min pour extraire 4,4 % sur b.s soit 4,2 % b.h. Le temps total Δt pour extraire ΔX_{mt} de 12,46 g/g b.s soit 92,57 % d'eau sur base humide est de 2h 45min (165min) au cours du séchage de ces rondelles de carotte de 5,8 mm d'épaisseur.

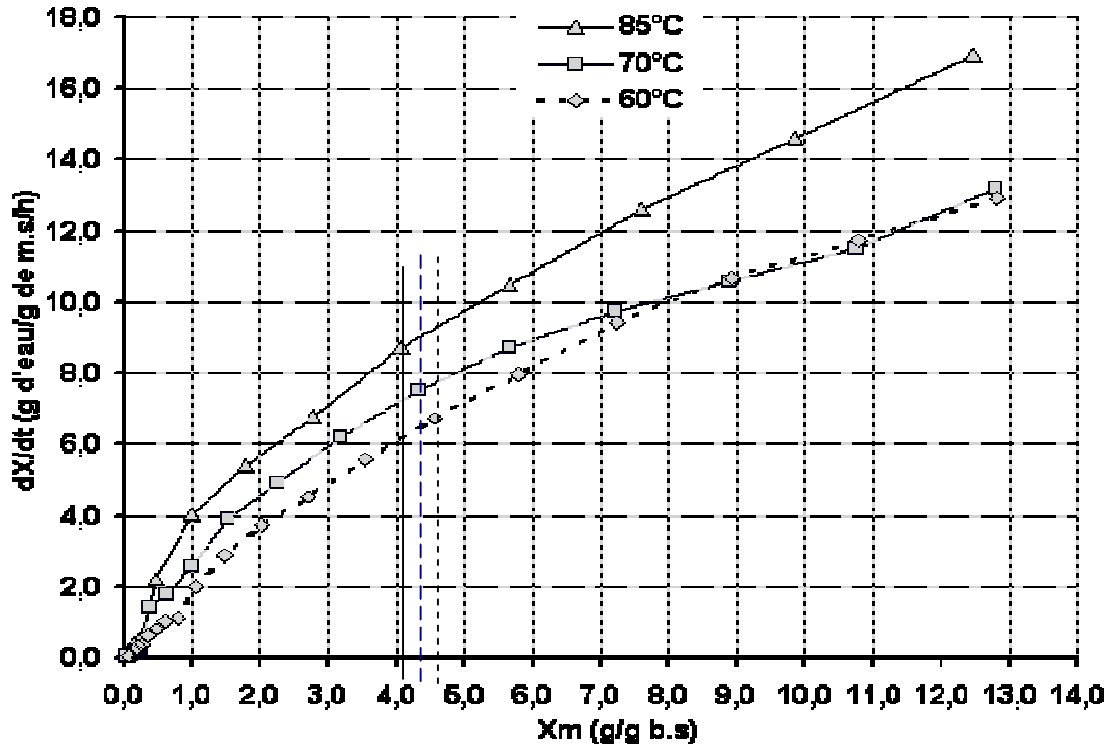


Figure 3c : Effet de la température sur la vitesse de séchage des rondelles de carotte de 5,8 mm d'épaisseur; $dX/dt = f(X_m)$

► Le changement de pente est observé (figure 3 b et 3c) à 55min (60 et 70 °C) et à 45min (85 °C) de séchage, il correspond à X_m de 4,56 ; 4,33 et 4,08 g/g b.s (82,0 ; 81,24 et 80,3 % b.h) et à une vitesse de 6,72 ; 7,5 et 8,7g d'eau/g m.s/h respectivement. Ces points correspondent à l'évaporation de 8,27 ; 8,48 et 8,42 g/g b.s soit 89,2 ; 89,45 et 89,38 % sur base humide.

La vitesse de séchage montre une évaporation plus élevée au début avec $(-dX/dt)_i$ élevée jusqu'au point d'inflexion avec changement de l'allure de la courbe et abaissement de la vitesse au fur et à mesure que la teneur en eau résiduelle diminue.

La diminution de la quantité d'eau évaporée à partir du point d'inflexion, ainsi que la faible vitesse à ce niveau, nécessite une durée plus longue pour éliminer de faibles quantités d'eau jusqu'à X_{mf} qui est de 4h 30min (270min); 3h (210min) et 2h (120min). Ce temps correspond à 83,1 ; 79,2 et 72,7% de la durée totale respective (60 ,70 et 85°C) du séchage.

►► Au temps t_m initial de 5min (figure 4b et 4c), les vitesses initiales $(-dX/dt)_i$ des courbes de séchage des rondelles de carotte d'épaisseur $8,7 \pm 0,3$ mm à 60 ; 70 et 85 °C sont respectivement de 9,6 ; 9,8 et 10,8 g d'eau/g m.s/h où celle de 85°C est plus élevée que les deux autres, correspondant aux teneurs en eau initiales X_{mi} de 13,1 pour 60 et 70 °C et 13,0 g/g b.s pour 85 °C soit 92,9 et 92,86 % b.h. L'effet de la température est faible en début de séchage jusqu'à 1h (60min) avec les écarts types des trois courbes qui se chevauchent (figure 4 a). Au delà, les cinétiques évoluent séparément jusqu'au temps de 1h45min (115min) où les courbes de 60 et 70°C se confondent à X_m 4,135 et 4,25 g/g b.s, aux vitesses

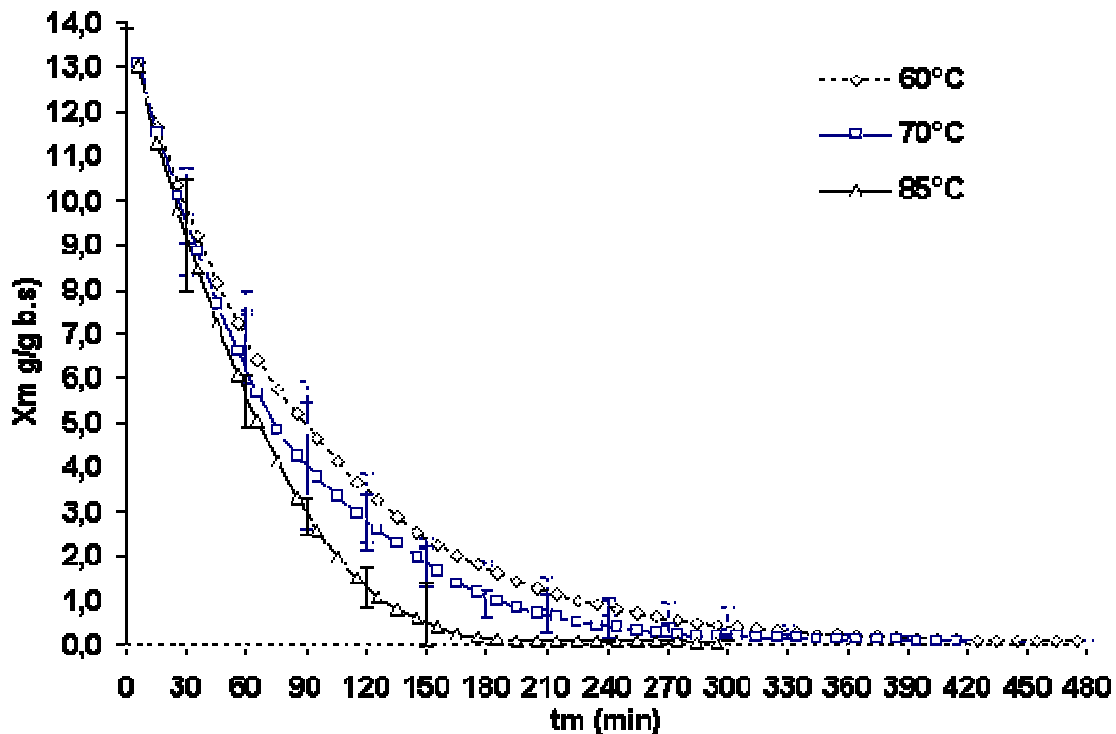


Figure 4a : Effet de la température sur la cinétique de séchage de rondelles de carotte à d'épaisseur 8,7 mm; $X_m = f(t_m)$

respectives de 2,82 et 3,0 g/g/h pour se séparer à 3h 55min (235min) et se rejoindre à la fin du séchage. La courbe de 85°C évolue séparée des deux autres courbes jusqu'à la fin du séchage (figure 4 c).

► La courbe de séchage à 60 °C montre que les rondelles atteignent la teneur en eau suffisante X_{m1} de 0,095 g/g b.s (8,67 % b.h) à Δt_1 7h05min (425 min) de séchage qui est suffisant pour éliminer ΔX_{m1} de 13,01 g/g b.s soit 92,86 % b.h. La teneur en eau finale X_{mf} de 0,06g/g b.s (5,66% b.h) est atteinte avec un temps supplémentaire de 50 min pour évaporer

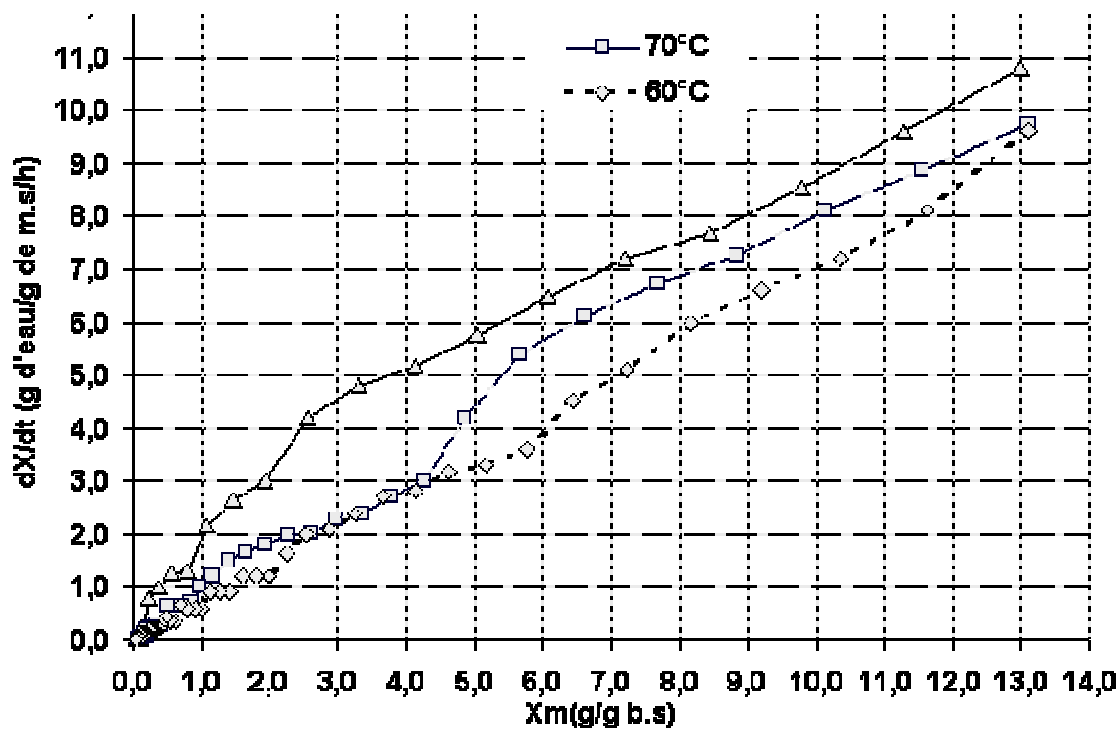


Figure 4c : Effet de la température sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte de 8,7 mm d'épaisseur; $dX/dt = f(Xm)$

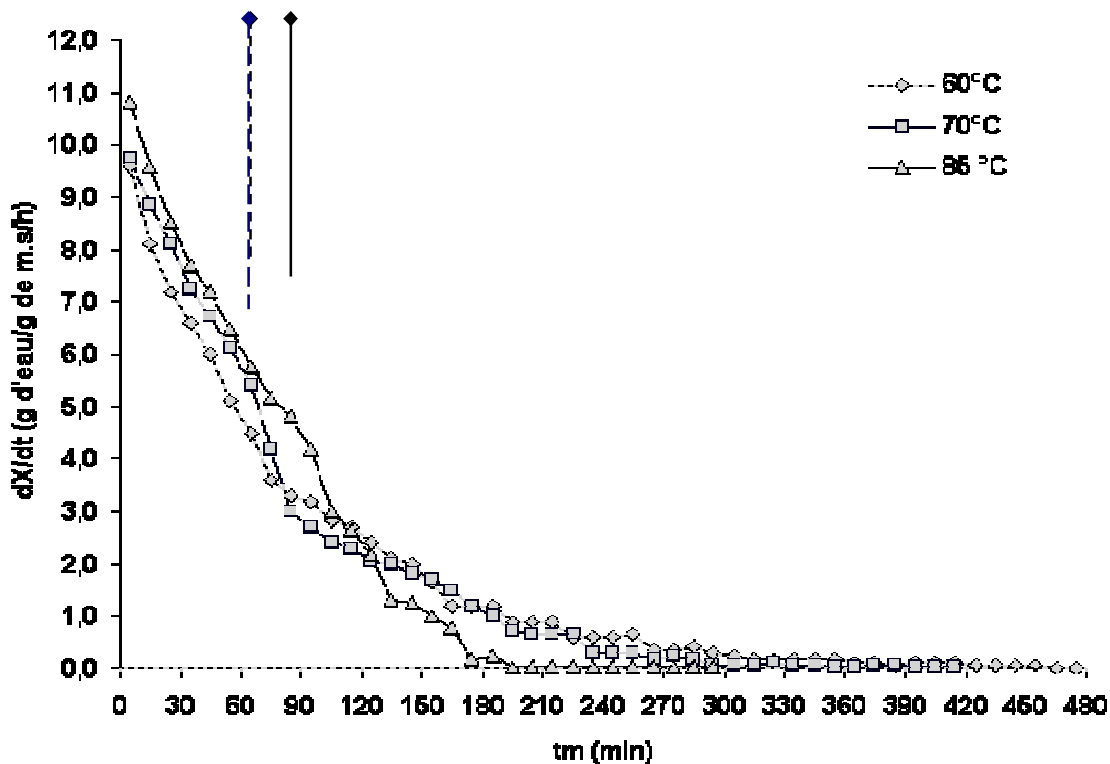


Figure 4b : Effet de la température sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte de 8,7 mm d'épaisseur : $dX/dt = f(tm)$

la quantité de 3,35% b.s (3,38% b.h). Le temps total pour évaporer ΔX_{mt} de 13,04 g/g b.s soit 92,88% b.h, est de 7h 55min (475 min) au cours du séchage des rondelles de cette épaisseur.

► La courbe de séchage à 70 °C montre que la teneur en eau ciblée est atteinte au bout de Δt_1 6 h 35min (395 min) avec $X_{m1} = 0,097$ g/g b.s soit 8,84 % b.h pour évaporer ΔX_{m1} de 12,99 g/g b.s soit 92,85 % b.h. La teneur en eau finale $X_{mf} = 0,086$ g/g b.s (7,92 % b.h) est atteinte avec 20 min de plus de pour éliminer 0,011 g/g b.s (1,088 % b.h). La durée totale pour éliminer ΔX_{mt} de 13,0 g/g b.s (92,86 % b.h) est Δt_t de 6h55min (415 min) au cours du séchage de ces rondelles.

► La courbe de séchage à 85 °C montre que X_m de 0,098 g/g b.s (8,92 % b.h) est atteinte au bout de 3h 15min (195 min) avec ΔX_{m1} 12,9 g/g b.s soit 92,8 % b.h. La teneur en eau $X_{mf} = 0,05$ g/g b.s soit 4,76 % b.h nécessite un temps de plus de 1h 40min (100min) pour évaporer 0,048 g/g b.s soit 4,58 % b.h. La durée totale pour évaporer ΔX_{mt} 12,95 g/g b.s soit 92,83 % sur base humide est de 4h 55min (295min) au cours du séchage de ces rondelles.

► Le changement de pente est observé à 65 min pour le température de 60 et 70°C et à 85 min pour 85°C (figure 4 b), correspondant à des vitesses de 4,5 ; 5,4 et 4,8 g/g m.s/h et aux X_m respectives de 6,43 ; 5,65 et 3,30 g/g b.s (86,54 ; 84,96 et 76,74 % sur b.h) (figure 4 c) . Ces points correspondent à l'évaporation des ΔX_m de 6,68 ; 7,44 et 9,7 g/g b.s soit 86,98; 88,15 et 90,65 % sur base humide.

La vitesse de séchage montre une évaporation élevée au début avec $(-dX/dt)_i$ relativement élevée jusqu'au point d'inflexion avec changement de l'allure de la courbe et abaissement de la vitesse au fur et à mesure que la teneur en eau résiduelle diminue.

La diminution de la quantité d'eau évaporée à partir du point d'inflexion, et la faible vitesse à ce niveau, nécessite une durée plus longue pour éliminer de faibles quantités d'eau jusqu'à X_{mf} respective qui est de 6h 50min (410min); 5h50min (350min) et 3h (210min). Ce temps correspond à 86,3 ; 84,3 et 71,18 % de la durée totale respective (60 ,70 et 85°C) du séchage.

► La courbe de séchage à 60 °C (figure 5 a), montre qu'à Δt_1 445 min (7h 25min), les rondelles atteignent la teneur en eau moyenne X_{m1} de 0,101 g/g b.s (9,17 % sur b.h). Ce temps de 4h 45min a suffit pour éliminer ΔX_{m1} de 13,26 g d'eau /g de m. s soit 92,99 % sur base humide de la totalité de l'eau contenue dans la carotte. Cette teneur en eau moyenne atteinte constitue la teneur en eau finale X_{mf} étant donné que le séchage de ces rondelles de carotte de 12,9 mm est terminé par l'évaporation de cette quantité d'eau uniquement.

► La courbe de séchage à 70 °C (figure 5 a), montre qu'à Δt_1 405 min (6h 45min), les rondelles atteignent la teneur en eau moyenne X_{m1} de 0,099 g/g b.s (9,00 % sur b.h). Ce

temps de 6h 45min a suffit pour éliminer ΔX_{m1} de 13,10 g d'eau /g de masse sèche soit 92,9 % sur base humide de la totalité de l'eau contenue dans la carotte. La teneur en eau moyenne finale X_{mf} 0,054 g/g b.s (5,12 % b.h) est atteinte avec 1h 30min (90min) de plus pour évaporer 4,4 % b.s (4,21 % b.h). La durée totale pour l'évaporation de ΔX_{mt} de 13,15 g/g b.s soit 92,93 % sur base humide de la totalité de l'eau contenue dans la carotte est Δt_t de 8h15min (495 min) au cours du séchage de ces rondelles de 12,9 mm.

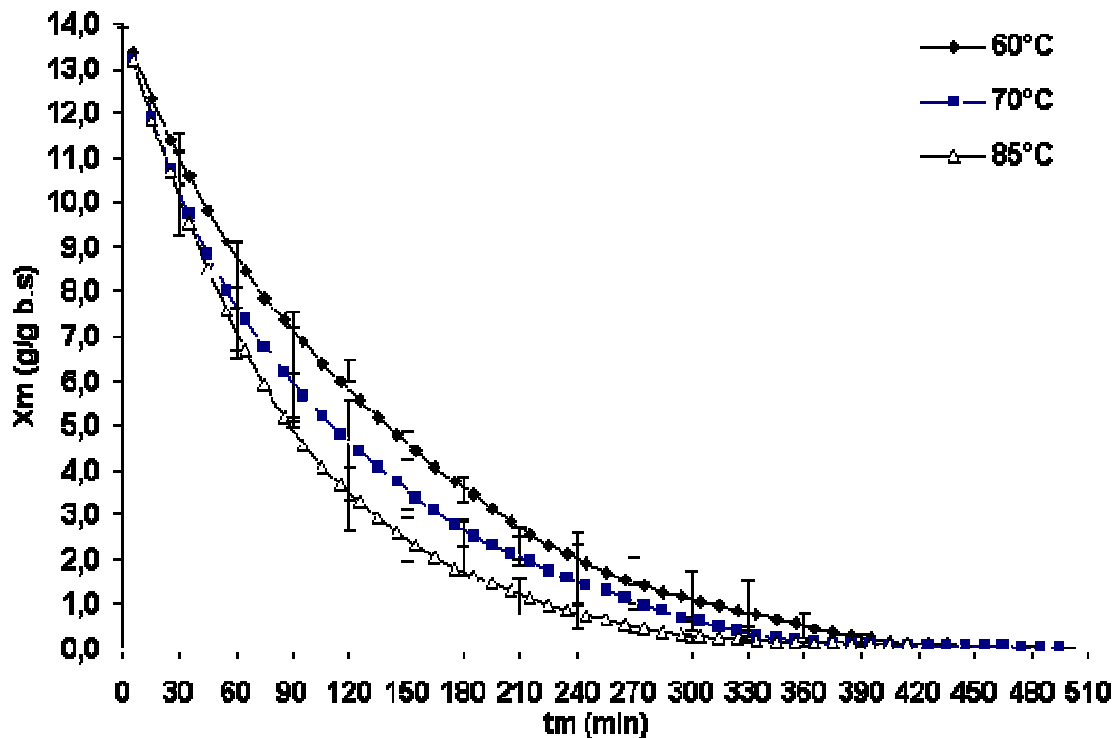


Figure 5a : Effet de la température sur la cinétique de séchage de rondelles de carotte de 12,9mm d'épaisseur ; $X_m = f(t_m)$

► La courbe de séchage à 85 °C (figure 5 a), montre qu'à Δt_t 415 min (6h 55min), les rondelles atteignent la teneur en eau moyenne $X_{m1}=0,12$ g/g b.s (10,71 % sur b.h). Ce temps de 6h 55min a suffit pour éliminer ΔX_{m1} de 13,07 g d'eau /g de masse sèche soit 92,89 % b. h de la totalité de l'eau contenue dans la carotte. Cette teneur en eau atteinte constitue la teneur en eau finale X_{mf} étant donné que le séchage est terminé par l'évaporation de cette quantité d'eau uniquement au cours du séchage de ces rondelles de carotte de 12,9 mm.

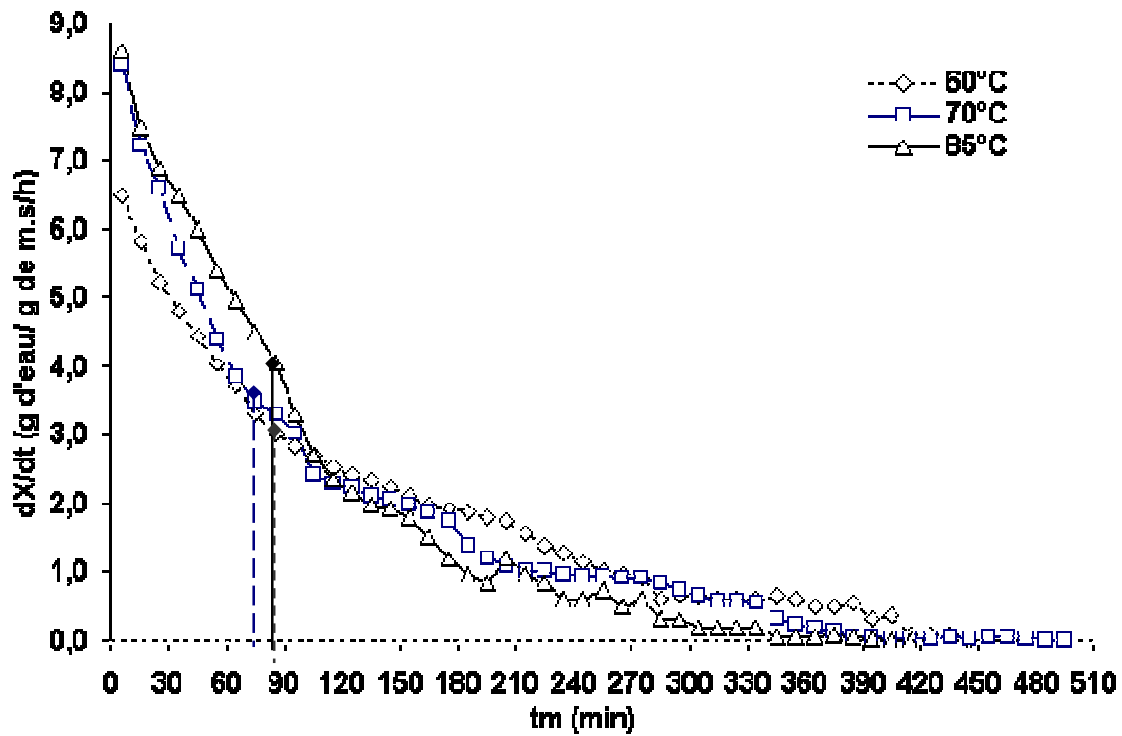


Figure 5b : Effet de la température sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte de 12,9 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(t_m)$

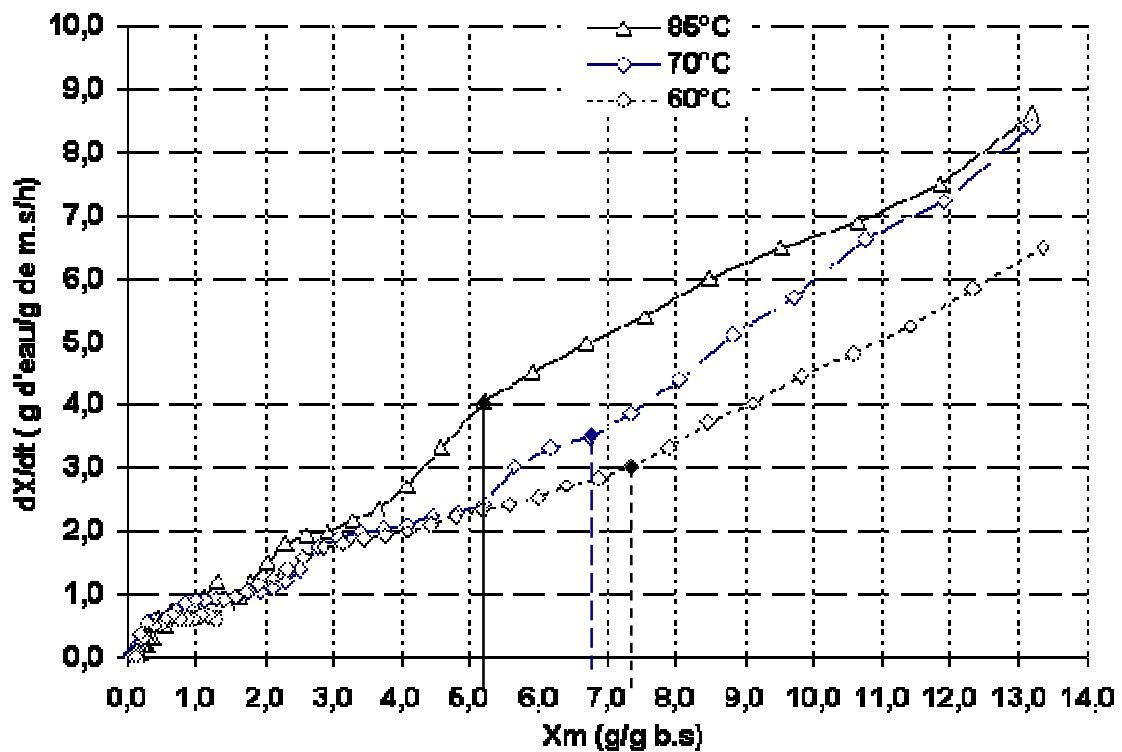


Figure 5c : Effet de la température sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte de 12,9mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(X_m)$

► Le changement de pente est observé à 85 min pour le température de 60°C, à 75 min pour 70°C et à 85 min pour 85°C (figure 5 b), correspondant à des vitesses de 3,00 ; 3,48 et 4,05 g/g m.s/h et aux X_m respectives de 7,35 ; 6,74 et 5,19 g/g b.s (88,02 ; 87,08 et 83,84 % sur base humide) (figure 5 c). Ces points correspondent à l'évaporation des ΔX_m de 6,01 ; 6,46 et 8,00 b.s soit 85,73; 86,59 et 88,89 % sur base humide.

La vitesse de séchage montre une évaporation modérément élevée au début avec $(-dX/dt)_i$ inférieures à 10 g/g m.s/h (figure 5 c) jusqu'au point d'inflexion avec changement de l'allure de la courbe et abaissement de la vitesse au fur et à mesure que la teneur en eau résiduelle diminue.

La diminution de la quantité d'eau évaporée à partir du point d'inflexion, ainsi que la faible vitesse à ce niveau, nécessite une durée plus longue pour éliminer de faibles quantités d'eau jusqu'à X_{mf} respective qui est de 6h (360min); 7h (420min) et 5h30min (330min). Ce temps correspond à 80,9 ; 84,85 et 79,51 % de la durée totale respective (60 ,70 et 85°C) du séchage.

L'influence de la température de l'air sur la vitesse de séchage est toujours très importante. Selon BIMBENET (1984), on peut trouver des indications sur l'influence de la vitesse, de la teneur en eau de l'air, des dimensions du produit, de sa teneur initiale en eau sur les courbes de séchage et leur interprétation.

L'effet de la température sur le séchage des rondelles d'épaisseur de 5,8 mm, montre que la température élevée de 85°C a un effet plus significatif sur l'allure de séchage où l'on observe que le séchage est plus rapide par rapport au deux autres températures de 70 et 60°C dont les courbes démarrent avec des vitesses d'évaporation différentes et se rejoignent ensuite en cours de séchage et se confondent. Cependant la vitesse d'évaporation semble intéressante avec les trois températures pour cette épaisseur avec une vitesse initiale élevée et un temps de séchage assez court.

L'effet de la température sur le séchage des rondelles de $8,7 \pm 0,3$ mm d'épaisseur est plus significatif, la courbe de 85°C est nettement différente avec un séchage plus rapide. La courbe de séchage de 60°C est plus lente que celle de 70°C. Dans ce cas de figure l'effet de la température sur l'allure de séchage est aussi important que le cas précédent.

La vitesse de séchage de la carotte d'épaisseur 12,9 mm, montre qu'avec les deux températures de 85 et 70 °C les courbes de séchage évoluent séparément et se distinguent l'une de l'autre montrant un effet significatif de ce paramètre, par rapport à celle de 60 °C qui est plus lente montrant une différence avec les deux autres en début et se confond ensuite avec celle de 70 °C, sa durée de séchage et son taux d'évaporation semblent être les plus

longs des trois températures (7h 25min). Dans ce cas l'effet de la température est moins important que les deux cas précédents.

KROKIDA et coll. (2003), rapportent dans leur travail que l'effet des paramètres sur le processus de séchage, il y'a accélération du processus de séchage du à l'augmentation de la température de l'air de 65 à 85°C ; il est évident que durant les premières périodes du séchage l'effet de ce paramètre est considéré très important, ce qui rend la température de séchage comme un facteur très important dans la vitesse de séchage sur tous les produits examinés.

Les observations de ces auteurs sont remarquées avec l'allure et la vitesse de séchage des rondelles de carotte où l'effet de la température est important en début puis il s'atténue en fin de séchage. Ceci est montré par la différence des vitesses de séchage initiales des différentes températures où la plus élevée est celle de 85 °C suivie par celle de 70 °C et enfin ,la plus faible est celle de 60 °C.

2-2-3-Effet de la dimension sur la vitesse de séchage

Le résultat de l'effet de l'épaisseur de découpe sur la cinétique de séchage des différents légumes est exprimé par des courbes, montrant l'influence de ce paramètre sur le comportement de chaque produit au cours du séchage.

La description de l'évolution du séchage des différentes courbes étant déjà faite au niveau du chapitre précédent nous nous limiterons dans ce cas à donner l'effet de la taille de découpe.

Les figures 6a, 7a et 8a sont présentées au niveau de l'annexe 1.

► L'allure des courbes de séchage de la carotte , montre qu'à 60 °C l'effet de la découpe est remarquable dès le début du séchage où les trois courbes démarrent avec des vitesses initiales nettement différentes (figure 6b et 6c). La vitesse de séchage ($-dX/dt$)i la plus élevée est observée chez la petite épaisseur suivie par celle qui lui est supérieure et la plus faible vitesse est obtenue par la plus épaisse des découpe respectivement de 12,9 ; 9,6 et 6,5 g/g m.s/h.

La durée de séchage suffisante pour atteindre la teneur en eau ciblée (< 10% b.s) est plus courte avec l'épaisseur de 5,8mm, que celle de 8,7mm et la plus longue correspond à l'épaisseur 12,9 mm , avec des Δt_1 de 3h35min (245 min), 7h 05min (425 min) 7h25min (445min) correspondants aux ΔX_{m1} respectives de 12,73 ; 13,01 et 13,26 g/g b.s soit 92,72 ; 92,86 et 92,99 % sur base humide.

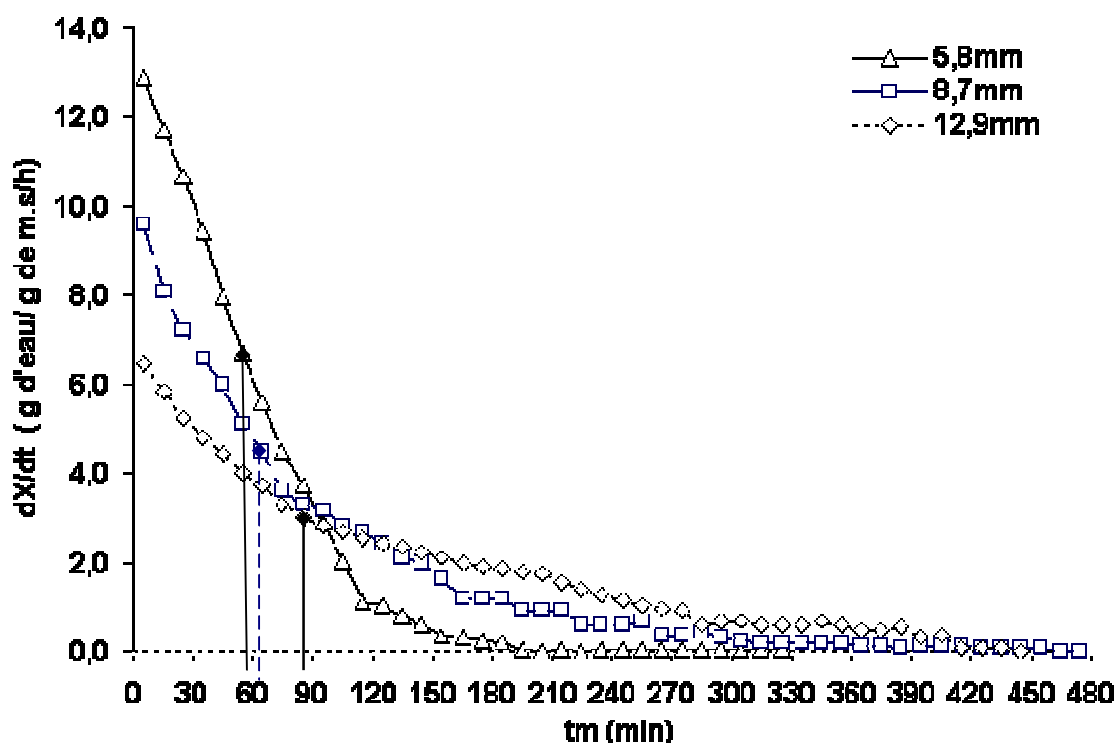


Figure 6b : Effet de l'épaisseur de découpe sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte à 60°C; $dX/dt = f(t_m)$

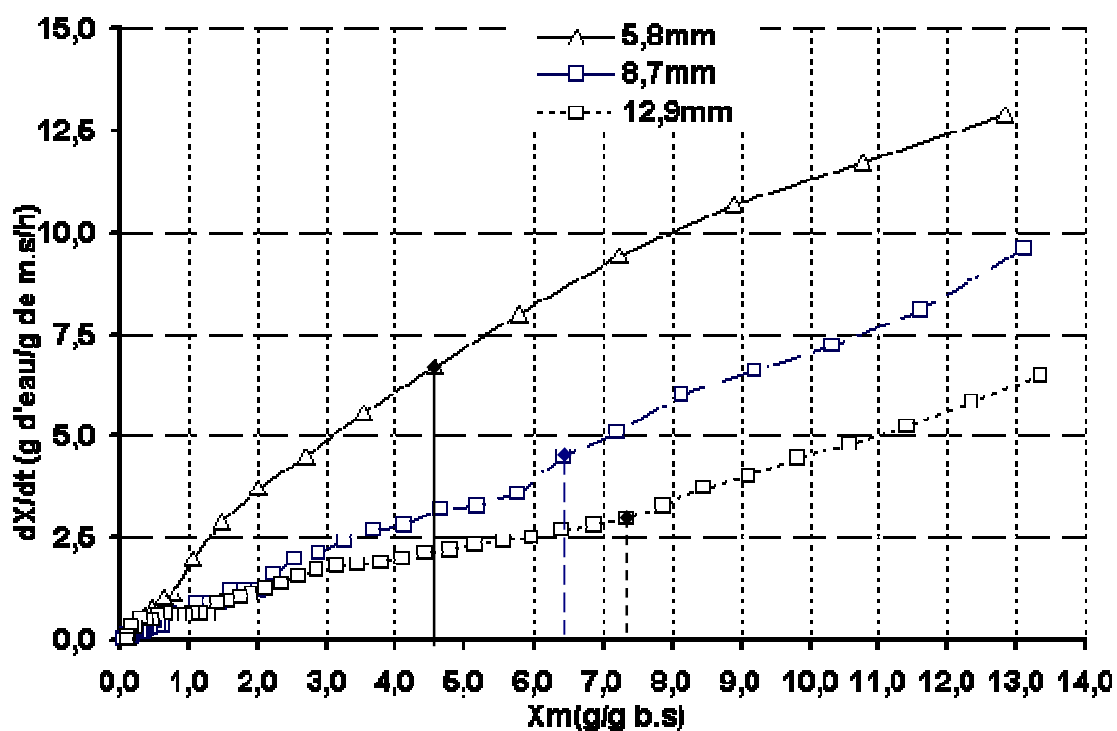


Figure 6c : Effet de l'épaisseur de découpe sur la vitesse de séchage des rondelles de carotte à 60°C ; $dX/dt = f(X_m)$

L'effet de l'épaisseur s'atténue pour les courbes de rondelles d'épaisseur 8,7 et 12,9mm aux vitesses respectives de 1,2 et 1,26 g/g m.s/h correspondant aux X_m de 2,0 et 2,105 g/g b.s (66,67% et 67,79% b.h) jusqu'à la fin du séchage.

► L'allure des courbes de séchage de la carotte à 70 °C (figure 7b et 7c), montre que l'effet de la découpe est important. Les courbes des trois épaisseurs démarrent avec des vitesses de séchage initiales $(-dX/dt)_i$ différentes où la plus élevée est obtenue par l'épaisseur la plus petite 5,8±0,1mm suivie par celles de 8,7 mm et enfin la plus faible est obtenue par celle de 12,9 mm avec respectivement 13,2 ; 9,8 et 8,4 g/g m.s/h.

La durée de séchage suffisante pour atteindre la teneur en eau <10% b.s est plus courte avec l'épaisseur 5,8 mm suivie par celle de 8,7 et enfin la plus longue est celle assurée par 12,9mm étant plus épaisse avec respectivement 3h05min (185min), 6h35min(395min) et 6h 45min (405min). Ces temps correspondent aux ΔX_m de 12,71 ; 12,99 et 13,1 g/g b.s soit 92,7 ; 92,85 et 92,91 % sur base humide respectivement.

L'effet de l'épaisseur s'atténue pour les courbes de 8,7 et 12,9 mm aux vitesses respectives de 1,02 et 0,9 g/g m.s/h correspondant à X_m de 0,985 g/g b.s (49,6% b.h) jusqu'à la fin du séchage.

► L'allure des courbes de séchage de la carotte à 85°C (figure 8b et 8c), montre que l'effet de la découpe est très important. Les trois courbes démarrent avec des vitesses de séchage initiales $(-dX/dt)_i$ significativement différentes où la plus élevée est obtenue par l'épaisseur la plus petite 5,8±0,1mm suivie par celles de 8,7 mm et enfin la plus faible est obtenue par celle de 12,9 mm avec respectivement 16,9 ; 10,8 et 8,6 g/g m.s/h .

La durée de séchage suffisante pour atteindre la teneur en eau <10% b.s est plus courte avec l'épaisseur 5,8 mm suivie par celle de 8,7 et enfin la plus longue est celle enregistrée par la plus épaisse découpe 12,9mm, avec respectivement 1h 55min (115min); 3h 15min (195 min) et 6h 55min (415min). Ces temps correspondent aux ΔX_m de 12,39 ; 12,9 et 13,07 g/g b.s soit 92,53 ; 92,8 et 92,89 % sur base humide respectives.

L'effet de l'épaisseur est significativement important tout le long du séchage jusqu'aux basses teneurs en eau résiduelles <0,3 g/g b.s où les courbes de 8,7 et 12,9 mm se confondent.

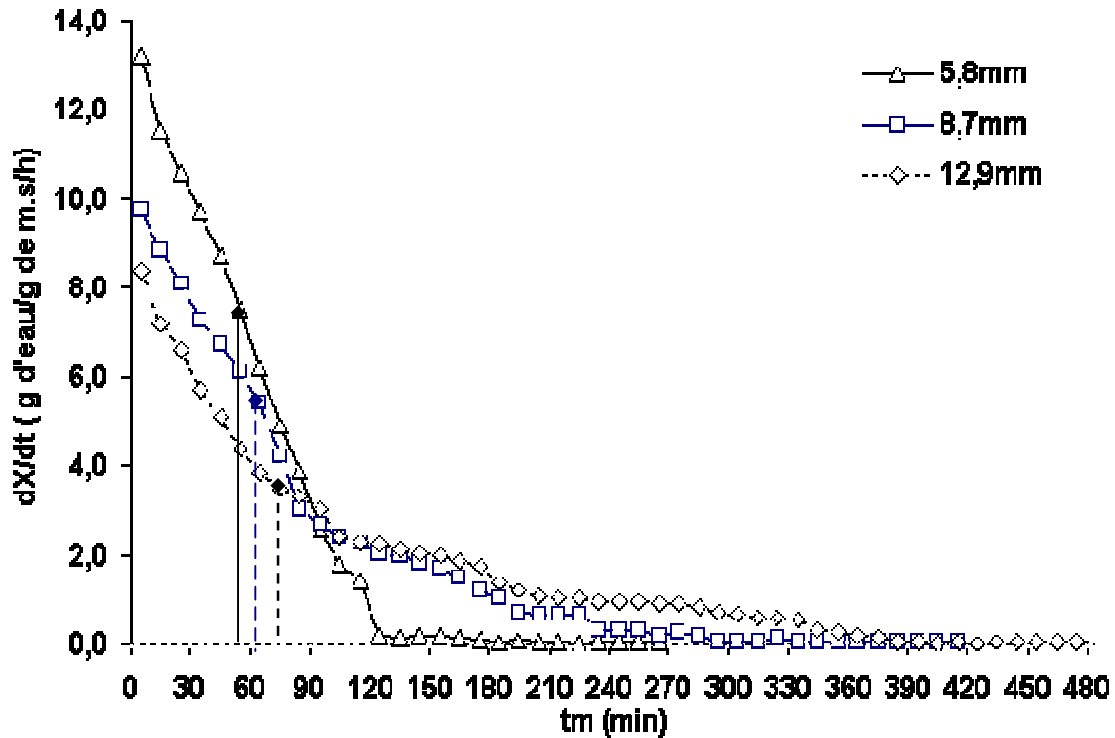


Figure 7b : Effet de l'épaisseur de découpe sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte à 70°C; $dX/dt = f(t_m)$

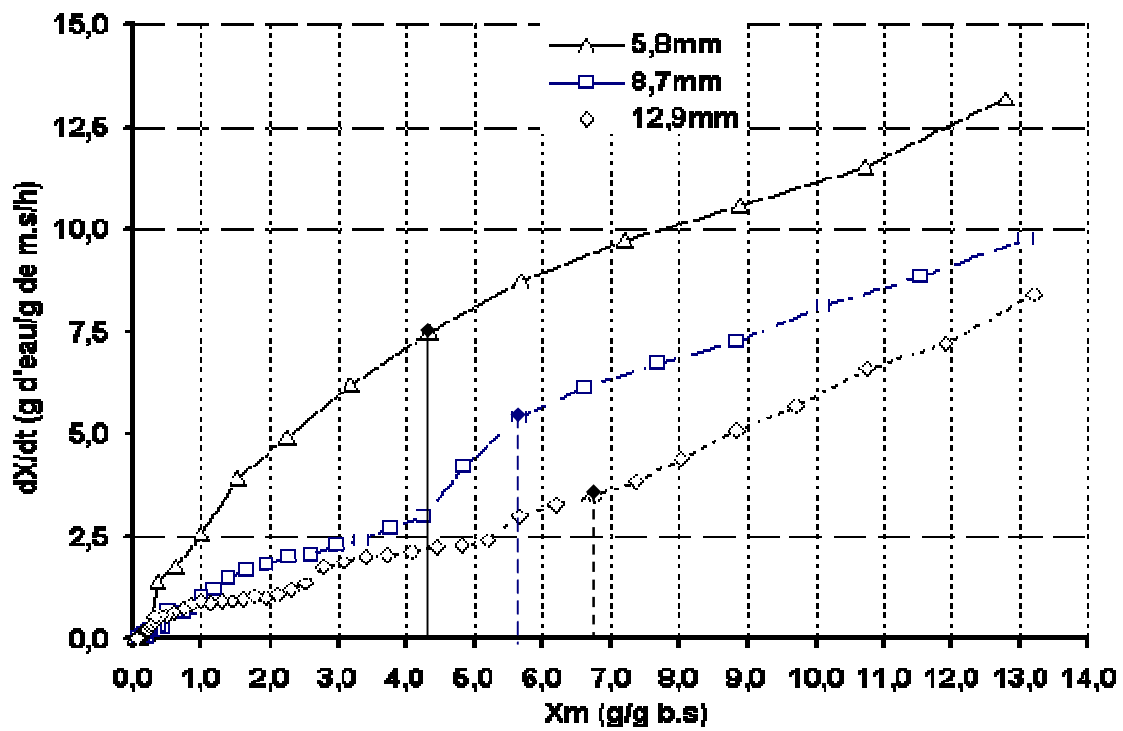


Figure 7c : Effet de l'épaisseur de découpe sur la vitesse de séchage des rondelles de carotte à 70°C ; $dX/dt = f(X_m)$

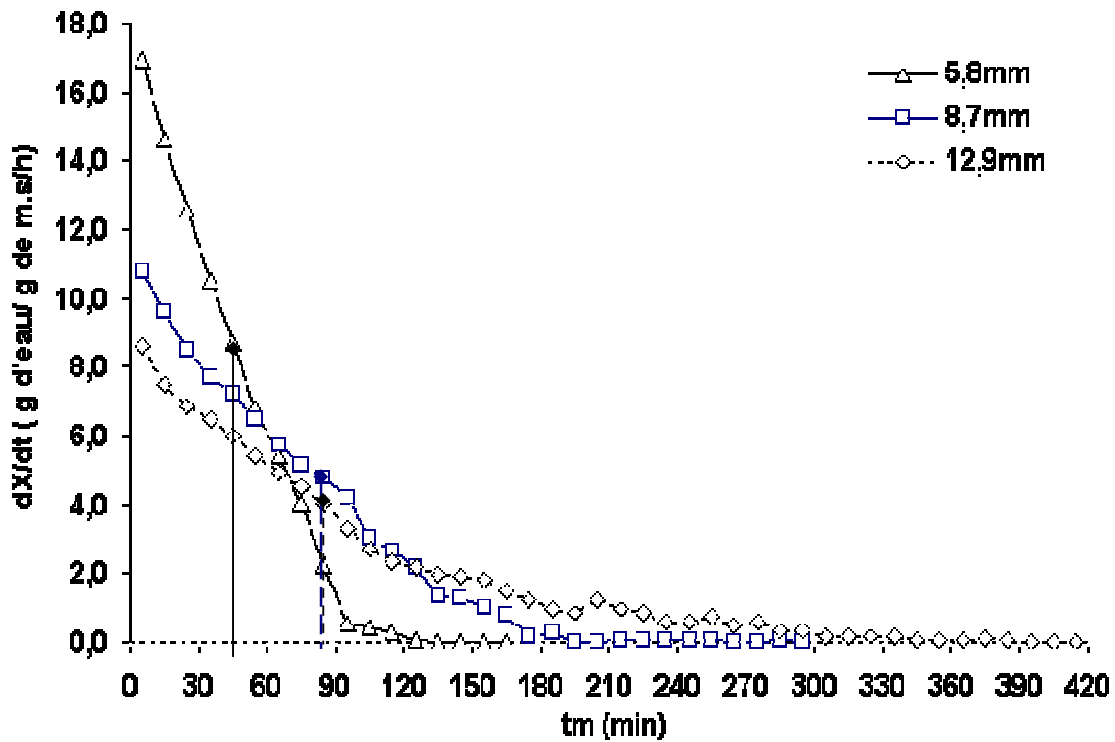


Figure 8b : Effet de l'épaisseur de découpe sur la vitesse de séchage de rondelles de carotte à 85°C ; $dX/dt = f(t_m)$

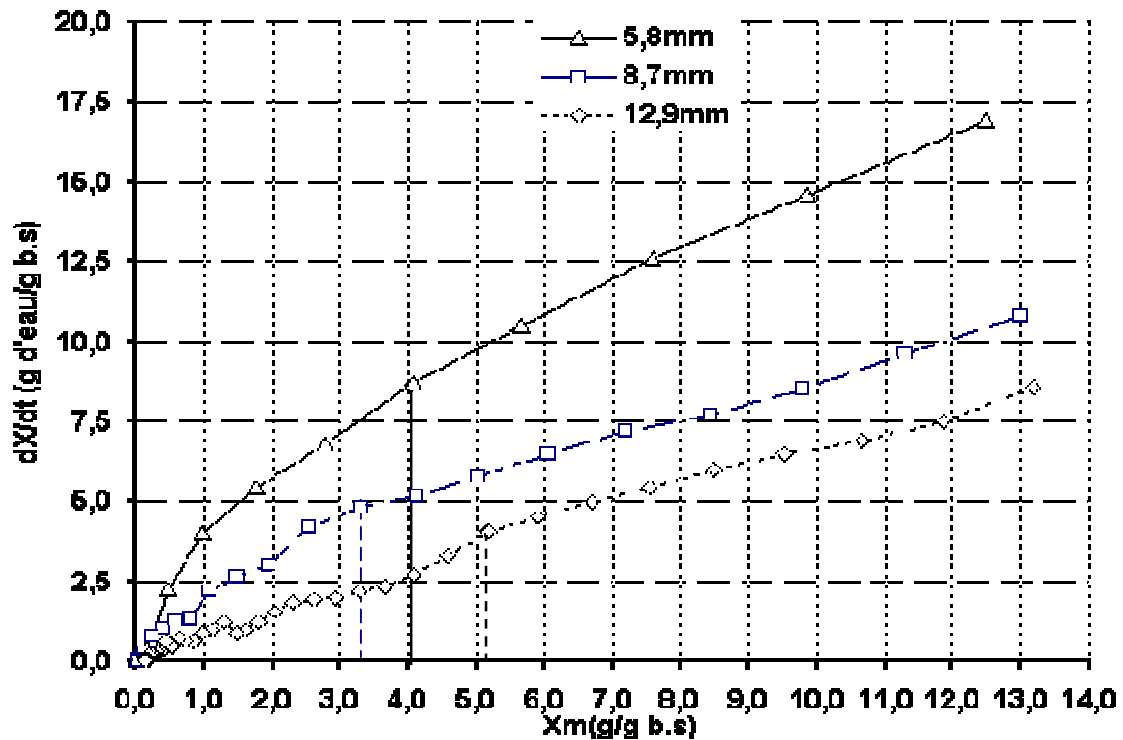


Figure 8c : Effet de l'épaisseur de découpe sur la vitesse de séchage des rondelles de carotte à 85°C ; $dX/dt = f(X_m)$

Le séchage avec une température élevée telle que 85°C, montre qu'elle est plus intéressante, l'effet de l'épaisseur est clairement apparent sur la figure 8 c ,dont les courbes des trois épaisseurs sont bien distinctes où chacune a une vitesse d'évaporation significativement différente de l'autre. Malgré la diminution plus forte de la vitesse (pente la plus élevée), l'écart important entre les trois épaisseurs demeure en faveur de la moins épaisse (5,8 mm) qui reste la plus élevée, vient ensuite la moyenne (8,7 mm) et finalement la plus épaisse des découpes (12,9 mm) est la plus lente et sèche plus longtemps que les deux autres.

2-2-4- Discussion et conclusion

L'allure générale des différentes courbes de vitesse de séchage montre l'absence de la phase 0 de mise en température et la phase à allure de séchage constante. Ceci s'accorde avec les énoncés de la bibliographie pour les produits biologiques et notamment les légumes. Plusieurs auteurs qui ont séchés la carotte et d'autres légumes rapportent cette évidence. Selon BIMBENET (1984) ; MAFART (1991); BIMBENET et coll. (2002 a) et BIMBENET et coll. (2002 b), la période de mise en température n'est pratiquement pas détectée et n'a pas lieu lors du séchage des produits en particule ou en feuilles.

KROKIDA et coll.(2003) ont présenté des courbes de cinétiques de séchage de plusieurs légumes (pomme de terre,carotte, petit pois, poivron rouge,vert et jaune, ail, champignons, oignon, poireau, maïs, céleri, tomate et potiron (citrouille)) par convection d'air chaud à 65 ; 75 et 85 °C, coupés en 5; 10 et 15 mm d'épaisseur où les deux premières phases de mise en température et de vitesse constante n'apparaissent pas sur les courbes,mais uniquement la phase à allure décroissante est observable.

Cette phase n'est pas toujours identifiable, et n'est pas observée dans les produits biologiques, même lorsqu'il s'agit de produits dont l'humidité initiale est très importante (produits végétaux, produits carnés) quelle que soit leur teneur en eau au départ (BIMBENET ,1984 ; CHARREAU et CAVAILLE, 1991; ZIDOUNE,2002).

Les résultats de notre étude sur la carotte dont la teneur en eau initiale est supérieure à 90% sur base humide sont en accord avec de ce qui est annoncé par ces auteurs.

Donnant des exemples de courbes de séchage de la carotte coupée en cubes à différentes températures (40,60 ,80 et 100°C) et une vitesse de l'air de 1m/s, WOLF (1983) cité par BIMBENET(1984), montre que l'essentiel du processus s'effectue en période II puisque la

vitesse de séchage diminue tout le temps, comme observé sur les figures de 3b et 3c à 8b et 8c de notre étude sur la carotte. Ce qui correspond à la période II et confirme l'inexistence (ou la très courte durée) de la période I dans le cas du séchage des produits biologiques. BIMBENET (1984) rappelle qu'il est important que toutes ces considérations se rapportent au séchage d'une couche mince de produit, ce qui est le cas de notre étude sur la carotte, où les rondelles sont disposées en monocouche lors du séchage.

Le séchage à air chaud est considéré comme l'une des plus simples et économiques des voies de commercialisation des produits transformés tels que les fruits et légumes (BRENNAN et coll., 1991 cités par JOHNSON et coll., 1998).

JOHNSON et coll. (1998) rapportent que la durée de séchage est variable en fonction de l'épaisseur des échantillons et concluent que aussi bien la température de l'air que l'épaisseur des échantillons affecte significativement la vitesse de séchage. Le rétrécissement (le changement de la dimension) exprimé en volume durant le séchage suit une relation linéaire de la teneur en eau.

D'après les résultats de l'effet des paramètres (température et épaisseur), il apparaît que l'effet de l'épaisseur de découpe sur la cinétique et la vitesse de séchage est plus intéressant et plus significatif. Les courbes des trois épaisseurs (figures 6c, 7c et 8c) sont bien distinctes et séparées, montrant des allures de séchages nettement différentes, évidemment la plus fine a une vitesse de séchage nettement plus élevée par rapport aux deux autres qui montrent une légère différence entre elles. Ensuite vient celle de $8,7 \pm 0,3$ mm, et enfin la plus épaisse montre l'allure la plus lente des trois épaisseurs.

La durée de séchage la plus courte est enregistrée par l'épaisseur $5,8 \pm 0,1$ mm à 85°C par rapport aux autres températures et épaisseurs pour presque la même quantité d'eau évaporée (92,5 à 92,99 %) de l'ensemble des rondelles séchées jusqu'à X_{m1} ($<10\%$ b.s). Le séchage de l'épaisseur de 12,9 mm à 60°C est le plus long des trois épaisseurs et températures.

On note que l'effet de l'épaisseur du produit l'emporte sur celui de la température de l'air sur la cinétique et la vitesse de séchage. Il est plus significatif, pour l'ensemble des courbes aux trois températures. L'effet de la température présente des périodes où il s'atténue, cas des températures de 60 et 70°C pour les épaisseurs de 8,7 et 12,9 mm, et il est significativement important comme le cas à 85°C qui présente des allures de séchage bien distinctes des deux autres températures pour presque la totalité des courbes de séchage.

Lors du séchage de la carotte par trois différents séchoirs PRAKASH et coll. (2004) rapportent que la durée de séchage est réduite avec l'augmentation de la température.

Le taux de déshydratation selon WANG et XI (2004), augmente avec une petite masse à sécher parce que le transfert est rapide, et la consommation d'énergie augmente avec des masses plus élevées et la diminution du taux d'humidité. Ceci conforte nos résultats concernant les épaisseurs de 5,8 mm (petite masse) et 12,9 mm (masse élevée) aux trois températures de séchage.

Les courbes de vitesses de séchage montrent qu'on peut les diviser en deux étapes, en fonction de la température de l'air et de la dimension (épaisseur de découpe) du produit à sécher. Moins le produit est épais plus il sèche rapidement, à une vitesse d'évaporation importante. Une première sous phase à vitesse d'évaporation rapide et une deuxième sous phase lente apparaissent sur les graphes et à partir des résultats de valeurs de vitesses de séchage en fonction du temps ou de la teneur en eau moyenne (figure 3 à 8).

La subdivision de la phase à vitesse de séchage décroissante a été rapportée par plusieurs auteurs.

BIMBENET et coll. (2002b) rapportent que la période de séchage à vitesse décroissante peut être divisée en deux ou trois sous-périodes. La totalité du séchage s'effectue à vitesse décroissante, avec une sous période à décroissance rapide, suivie d'une longue sous période à décroissance lente. Comme illustré sur nos courbes où il est délimité des points d'inflexion pour chacune des courbes (figures 3 à 8) montrant la subdivision en deux sous-phases pour l'ensemble des rondelles séchées.

Le séchage d'échantillons de carotte par micro-ondes par WANG et XI (2004), rapportent que le processus de séchage entier a lieu à allure décroissante. Cependant, ces auteurs ont observés deux vitesses de période de décroissance ; l'une à vitesse de descente rapide d'une phase d'humidité au-dessus de 1,0 bs, et la deuxième phase du taux d'abaissement jusqu'au contenu en eau < 1,0 bs. La teneur en eau de 1,0 bs correspond au point d'inflexion où le taux de déshydratation est le plus élevé est transformé en un taux de déshydratation lent.

SRIKIATDEN et ROBERTS (2006), lors du séchage de la pomme de terre, du cœur de la carotte et du cortex de la carotte par convection d'air chaud rapportent l'absence de la phase de séchage constante.

Durant la première phase de séchage selon WANG et XI (2004), le contenu en eau est plus élevé et le mouvement de l'eau se déroule beaucoup plus par transport transmembranaire et au travers de la membrane cellulaire, le taux de déshydratation est élevé, mais décroît rapidement avec le contenu en eau. Alors que pendant la deuxième phase de séchage, le taux

d'humidité est plus faible dans les carottes, par conséquent, le taux de déshydratation est faible.

Il paraît qu'en première sous phase dans le cas de nos échantillons, avec une vitesse de séchage élevée concerne l'eau faiblement liée qui est éliminée en premier, elle est plus facile à évaporer. RIZVI (1995) en expliquant les phénomènes qui se déroulent au cours de la phase décroissante de séchage, rapporte que dans les systèmes alimentaires, le mouvement des liquides est préférentiellement contrôlé par capillarité et forces de gravité. Il est vraisemblable que la partie de l'eau enlevée en première sous phase lors du séchage de nos rondelles de carotte soit retenue par les capillaires.

Les points d'inflexions des différentes courbes se situent à des X_m respectifs aux environs de 4,56 ; 4,33 et 4,08 g/g b.s (82,0 ; 81,24 et 80,3 % b.h) et à une vitesse de 6,72 ; 7,5 et 8,7g d'eau/g m.s/h (épaisseur de 5,8mm), de 6,43 ; 5,65 et 3,3 g/g b.s (86,54 ; 84,96 et 76,74 % sur base humide) à des vitesses de 4,5 ; 5,4 et 4,8 g/g m.s/h (épaisseur de 8,7 mm), et de 7,35; 6,74 et 5,19 g/g b.s (88,02 ; 87,08 et 83,84 % sur base humide) et à une vitesse de 3,00 ; 3,48 et 4,05 g d'eau/g m.s/h (épaisseur de 12,9mm) à 60,70 et 85°C respectivement. Il est remarqué que les vitesses les plus élevées à ce niveau sont celles de 85°C pour l'ensemble des courbes à l'exception de celle à 70°C pour l'épaisseur de 8,7 mm qui est supérieure à celle de 85°C. Les teneurs en eau atteinte à ce niveau sont plus élevées à 60°C qu'à 85°C pour les trois épaisseurs, cela confirme l'effet de la température sur la vitesse de séchage.

En deuxième sous phase la vitesse de séchage de la carotte devient lente. Selon MAFART (1991) plusieurs phénomènes expliquent le ralentissement de l'allure dans la deuxième sous phase. BIMBENET (1984), rapporte qu'il est admis que pendant cette période du séchage l'allure de séchage est ralenti.

Avec les aliments structurés, le mouvement du liquide se fait par diffusion. Par conséquent l'eau qui s'évapore à partir de la surface n'est pas immédiatement remplacée par le mouvement du liquide à partir de l'intérieur de l'aliment (RIZVI, 1995). Dans les produits non poreux, la diffusion de l'eau au sein du produit est aussi à l'origine de la diminution de la vitesse de séchage (CHARREAU et CAVAILLE, 1991).

Au cours de cette deuxième période à vitesse décroissante, selon RIZVI (1995) les parties de la surface du produit sont séchées par transfert convectif à partir de l'air, ainsi débute l'évaporation par diffusion à l'intérieur du produit où toute l'évaporation se produit à partir du

centre de l'aliment. L'allure de transport de la chaleur et de masse devient lente et tortueuse autant que l'humidité continue à diminuer. Ceci est observé sur les courbes de vitesse (figure 3 à 8) en fin de séchage où elles deviennent tortueuses.

La partie de l'eau éliminée dans cette sous phase concerne l'eau fortement liée et est transférée par diffusion à travers le produit ce qui fait que la vitesse d'évaporation est ralentie et la durée de séchage est plus longue que dans la première sous phase. Le Δt par rapport à la durée totale à partir des points d'inflexions jusqu'à X_{mf} est de 83,1 ; 79,2 et 72,7 % (épaisseur 5,8mm) , de 86,3 ; 84,3 et 71,18% (épaisseur 8,7mm), et de 80,9 ; 84,85 et 79,51% (épaisseur 12,9mm) respectivement à 60,70 et 85°C, il représente une partie importante de la durée du séchage.

2-2-5- Activité de l'eau (a_w) de la carotte séchée

Les rondelles utilisées pour la réalisation de cette mesure ont été séchées six (06) mois auparavant, conditionnées dans des sachets de polyéthylène thermo soudé et conservées à température ambiante du laboratoire. Elles ont été coupées aux épaisseurs de $5,8 \pm 0,1$; $8,7 \pm 0,3$ et $12,9 \pm 0,3$ mm et séchées aux températures de 60 et 70 °C aux teneurs en eau finales respectives de 0.021; 0.067 et 0.136 g/g b.s et de poids respectifs de 4,77 ; 3,43 et 3,25 g.

Le mélange en poudre, est pesé et mis à l'intérieur des différents bocaux contenant les solutions d'acide sulfurique ayant des HRE variées. Les échantillons sont maintenus à température ambiante de $26,0 \pm 1,3^\circ\text{C}$ jusqu'à équilibre et stabilisation de leur poids durant 9 jours. La masse moyenne des prises d'essais et la variation de masse au cours de la mesure est présentée dans le tableau 12.

Tableau 12 : Moyenne de la masse initiale et de la variation de masse des 3 essais :

Concentration d' H_2SO_4 % (v/v)	46	64	88	mi moyen (g)
HRE % à 25°C	43,82	10,89	0,082	
mi moyen (g)	$1,21 \pm 0,02$	$1,25 \pm 0,04$	$1,29 \pm 0,05$	$1,25 \pm 0,04$
$\Delta m = (m_i - m_f / m_i) \%$	4,14	5,00	5,27	

La moyenne des variations de masse en pourcentage rapportée à la masse initiale des trois essais réalisés permet de donner les points pour tracer la courbe à partir de laquelle est tirée la valeur de l' a_w de nos échantillons.

La détermination de la valeur de l'activité de l'eau est obtenue graphiquement à partir des courbes tracées pour chaque essai, avec un ajustement par une droite linéaire qui coupe l'axe des HRE au point correspondant à l'équilibre. La moyenne des valeurs des points d'intersection de trois essais est égale à $a_w=0,053 \pm 0,0013$.

La figure 9 montre le point d'intersection qui permet d'obtenir la valeur de l' a_w de rondelles de carotte.

Ainsi les rondelles de carottes séchées aux teneurs en eau finales comprises entre 0.02 et 0.13 g/g b.s (soit 1,96 -11,5% sur base humide), auraient une activité de l'eau voisine de 0,05

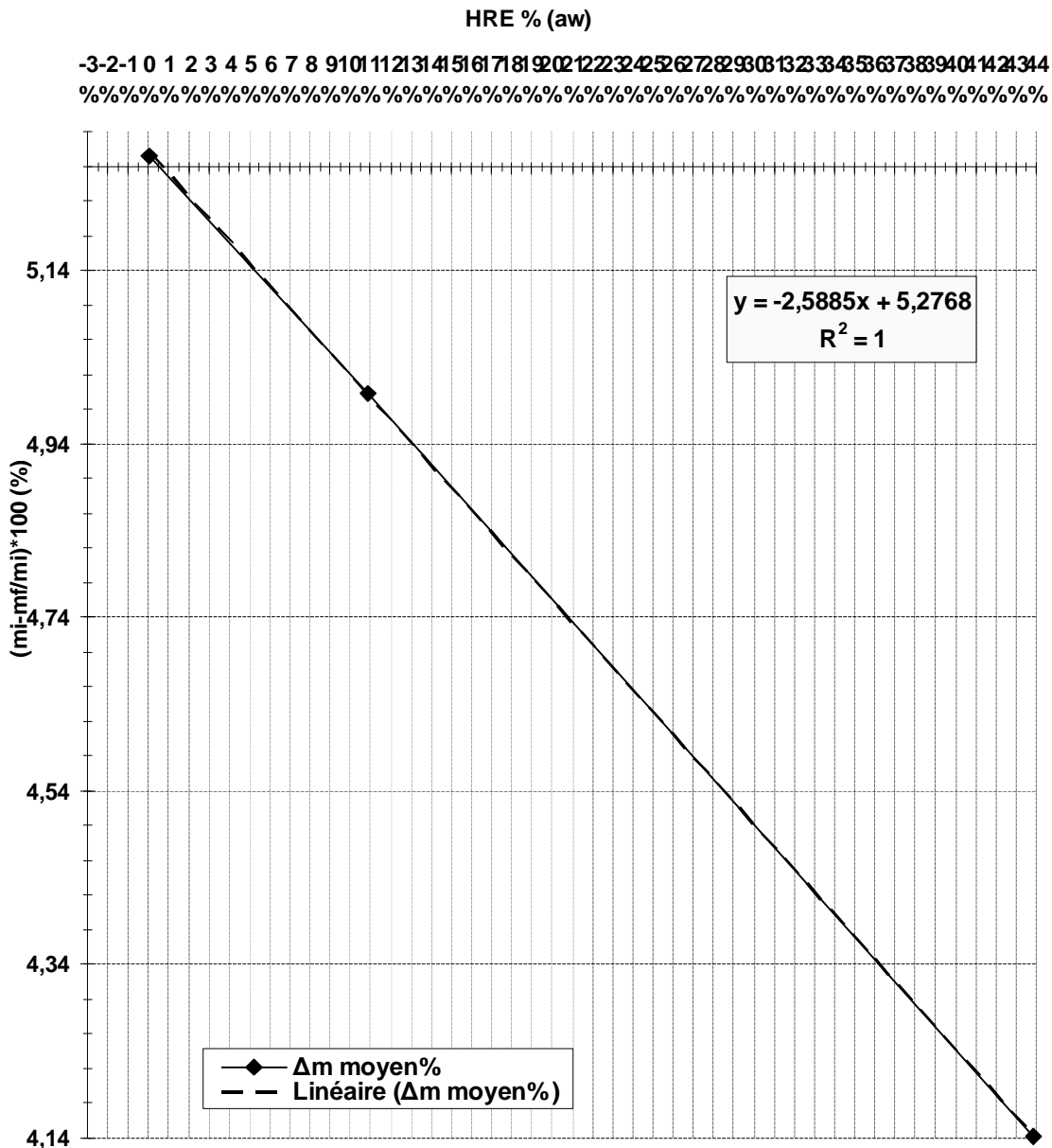


Figure 9 : Courbe de détermination de l' a_w de rondelles de carotte séchées

($a_w = 0,053 \pm 0,0013$) . Ce niveau d'activité compris entre 0 et 0,2 correspond aux forces de liaisons très intense empêchant le mouvement moléculaire de s'exprimer (MAFART ,1991), permet le prolongement de la durée de conservation de nos échantillons pour une durée relativement longue (probablement six autres mois supplémentaires) dans les conditions ambiante du laboratoire (25 ± 3 °C). BIMBENET et coll.(2002b) en rappelant que l'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année). Les teneurs en eau atteintes par le séchage de la carotte permettent sa conservation pour une durée d'une année. ROUX (1994), rapporte que la teneur en eau de 0,17-0,08 g/g de m.s (soit 14,5-7,4% base humide) et à partir d'une a_w de 0,3 le produit se conserve à l'abri de l'air (conditionnement) et à température ambiante (exemple de potages déshydratés).

ALAIS et coll. (2004) ; rapportent que l'oxydation des acides gras insaturés est très élevée dans les produits ayant une $a_w < 0,1-0,2$, par fixation de l'oxygène sur ces radicaux libres. La stabilité maximale est obtenue lorsque la monocouche des molécules d'eau ($a_w = 0,2$) s'oppose au passage de l'oxygène jusqu'au lipides ou entre en compétition avec les molécules d'oxygène pour occuper des sites d'absorption .En général cette stabilité est obtenue lorsqu'il ne subsiste que la couche monomoléculaire d'eau (eau liée) , ce qui correspond à une activité de l'eau de 0,1 à 0,2 .L'eau liée représente entre 3-10 g /100g de poids sec (3-10% b.s).

Ceci attire notre attention sur le fait que les produits aux a_w comme le notre doivent être conservés dans un emballage étanche à l'oxygène et opaque faisant barrière à la lumière et rayons du soleil pour éviter les risques d'oxydation et de décoloration du légume. Au cours de la conservation des carottes séchées nous avons relevé sur certaines rondelles une décoloration du probablement à la lumière, et étant donné la valeur de l' a_w obtenue qui est basse ($< 0,1$), il y aurait probablement une oxydation de la vitamine A du légume dont il est assez riche.

2-3- Effet du séchage sur la qualité de la carotte

2-3-1- Rétrécissement et déformation au cours du séchage

Le tableau 13 résume les mesures effectuées sur les rondelles d'épaisseur initiale $5,75 \pm 0,32$ mm au cours de leur séchage à 60 °C. Il rassemble les moyennes de trois essais de l'évolution de la teneur en eau X (g d'eau/g b.s) ; l'épaisseur et le diamètre des rondelles. A partir de ces valeurs, des courbes sont tracées montrant le taux de rétrécissement du légume qui exprime la

diminution de la dimension atteinte par les rondelles au moment t de la mesure par rapport à leur taille initiale en pourcent ($\text{épf} / \text{épi} \%$ et $\text{df} / \text{di} \%$) en fonction du temps et de la teneur en eau résiduelle du légume.

Il est à noter que les courbes de rétrécissement, tracées à partir des données de tableaux similaires au tableau 13 (donné en exemple) (figure 10 a), obtenues à partir de la moyenne de trois essais. Pour mieux suivre l'allure et l'évolution du rétrécissement, nous avons affectés aux trois variables, des courbes statistiques de tendances ; exponentielle (X) et logarithmique ($\text{épf} / \text{épi}$ et df / di), avec affichage du coefficient de corrélation sur les graphes pour chacune d'elles.

Tableau 13 : Taux de rétrécissement des rondelles de carotte séchées à 60°C, épi 5,75 mm

temps (min)	ép. f /ép. i (%)	d f/ d i (%)	X (g/g b.s)
t_0	100	100	13,900±0,00
30	88,89	99,08	7,997±0,70
60	78,61	86,73	4,157±1,08
90	69,72	77,91	1,588±0,11
120	46,39	70,78	0,705±0,01
150	48,33	69,48	0,405±0,12
180	40,83	63,07	0,223±0,07
210	38,50	65,75	0,139±0,04
240	44,89	64,58	0,124±0,01
270	42,56	64,58	0,086±0,05
300	40,83	62,61	0,080±0,02
330	36,94	55,96	0,058±0,05

RUIZ LOPEZ et coll. (2004) ont séché des carottes par convection d'air dans un sécheur armoire, à température entre 50 et 70°C, coupées en tranches de 6 cm de diamètre et d'épaisseurs de 10 à 15mm avec une vitesse de l'air autour de 2 m/s. Parmi les paramètres évalués : l'évolution de l'humidité et le changement des dimensions durant le séchage (rétrécissement), où les dimensions initiales et finales ont été mesurées avec un pied à coulisse. Ce dernier paramètre est établi après la mesure de l'épaisseur initiale et finale des tranches, et ils suggèrent la relation linéaire entre épaisseur et contenu en eau. Les résultats de l'épaisseur des tranches (cylindres ou rondelles) à la fin du séchage ont été entre 0,35 et 0,4 par rapport à l'épaisseur initiale. La relation linéaire est confirmée entre épaisseur et teneur en eau en rapport avec les résultats obtenus.

Dans notre cas le séchage de la carotte avec les deux épaisseurs, proches de celles de RUIZ LOPEZ et coll. (2004), (8,7 et 12,9 mm) aux deux températures de 60 et 70°C, nous avons

obtenu entre 0,27 et 0,39 de rapport entre l'épf / l'épi. Nos valeurs sont légèrement inférieure, probablement ceci est du à la teneur en eau initiale de nos produits qui est plus élevée avec une masse sèche faible et donc une plus grande quantité d'eau à éliminer créant plus de rétraction.

Selon HATAMIPOUR et MOWLA (2002) les produits alimentaires agricoles et spécialement les plantes racines (racines végétale) perdent beaucoup des caractéristiques physiques et structurales par des modifications durant le procédé de séchage. Leur

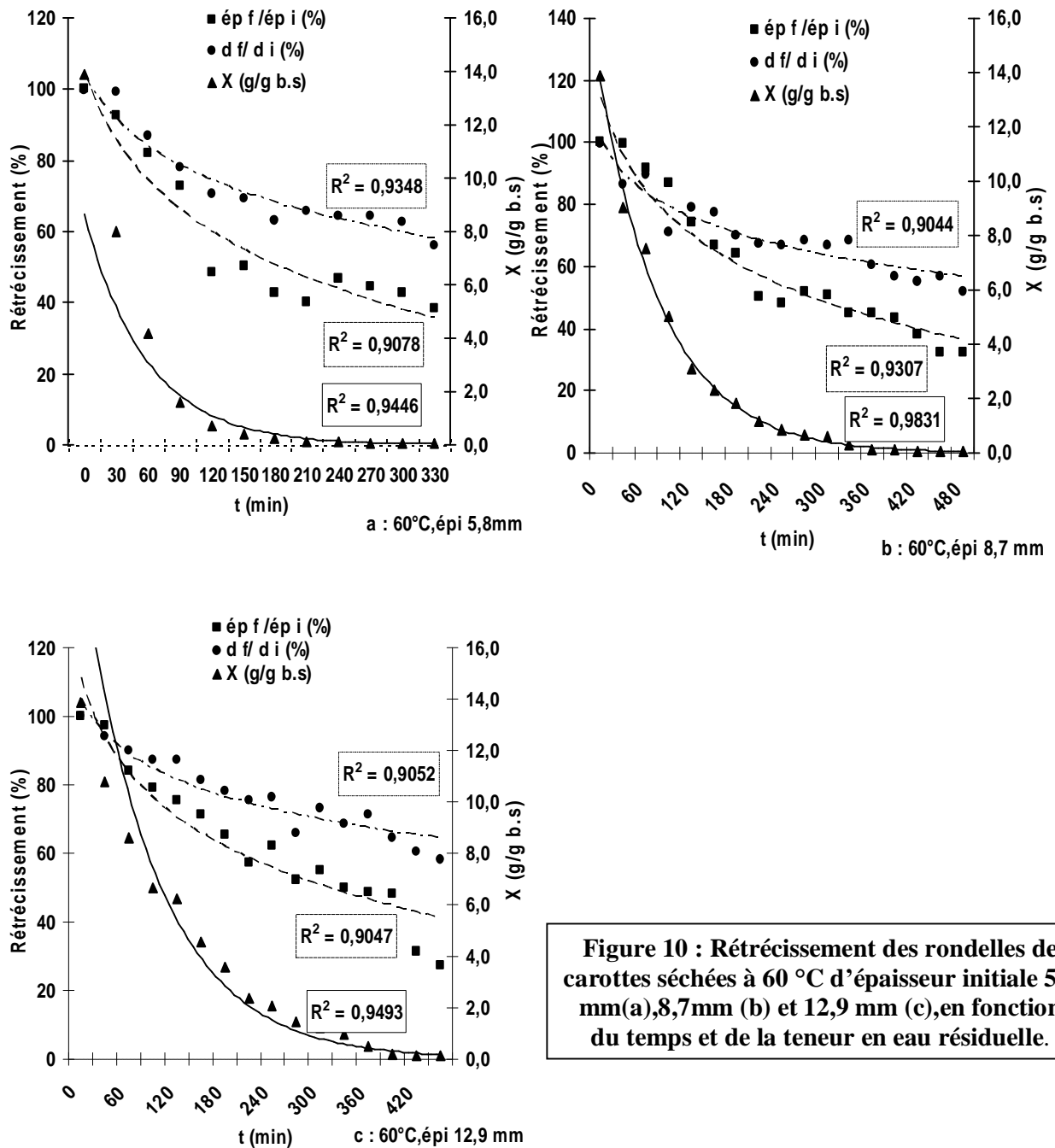


Figure 10 : Rétrécissement des rondelles de carottes séchées à 60 °C d'épaisseur initiale 5,8 mm(a),8,7mm (b) et 12,9 mm (c),en fonction du temps et de la teneur en eau résiduelle.

rétrécissement durant le séchage est important. Rapportant les résultats et conclusions de plusieurs travaux sur les produits végétaux et les légumes racines (carotte), ils annoncent qu'il y'a une grande corrélation linéaire entre le contenu en eau et les propriétés physiques des dits produits à propos du rétrécissement. Ceci corrobore nos résultats présentés sur les courbes des figures 10,11 et 12 où il est observé une évolution du rétrécissement en corrélation avec la diminution de la teneur en eau au cours du temps.

Les conclusions de HATAMIPOUR et MOWLA (2002) montrent que, durant le séchage, la carotte ayant un contenu en humidité naturelle autour de 90% maintient sa forme, cependant sa taille change par le fait de la grande perte d'eau au cours du processus.

Néanmoins, la contraction axiale (dans notre cas epf / épi) peut être représentée par une fonction linéaire de X, et peut être mieux corrélée à une fonction logarithmique de X, ce qui nous a amené à affecter cette dernière fonction à nos courbes (figures 10 ,11 et12) qui ont donné des coefficients de corrélation assez significatifs entre 0,90 et 0,97.

La variation de l'épaisseur et du diamètre des rondelles notée entre le début et fin du séchage et exprimée par les taux de rétraction indiqués dans les tableaux 14 a et 14 b qui résumant les mesures effectuées sur les rondelles séchées aux trois températures avec les dimensions initiales et finales correspondantes à chaque séchage. Ces taux représentent la partie du légume qui est perdue au cours du séchage et sont obtenus par :

$$(\text{épi} - \text{épf} / \text{epi}) * 100 \% \quad \text{et} \quad (\text{di} - \text{df} / \text{di}) * 100.$$

Les taux de rétraction sont présentés, dans le but de montrer la variation de la taille par rapport à l'état initial du légume et permettre de comparer les effets des paramètres (température et épaisseur de découpe).

Tableau 14 a : Rétraction axiale des rondelles de carotte séchées

T° (°C)	t*(min)	Xi b.s/ xi b.h%	Xf b.s	xf b.h%	ép.i (mm)	ép.f(mm)	Taux de rétraction
60°C	330	13,9/93,3	0,058±0,05	5,48	5,75±0,32	2,22±0,12	61,2±4,1
	420		0,09±0,03	8,26	8,71±0,11	2,92±0,17	66,3±2,3
	450		0,13±0,01	11,5	12,83±0,47	3,50±0,05	72,7±0,6
70°C	270		0,03±0,01	2,91	5,73±0,03	1,77±0,21	69,2±3,6
	420		0,084±0,02	7,75	8,82±0,08	3,40±0,29	61,4±3,1
	450		0,081±0,003	7,5	13,17±0,24	3,50±0,41	73,4±3,5
85°C	165		0,092±0,002	8,42	5,98±0,25	1,83±0,09	69,5±2,1
	300		0,093±0,01	8,51	8,60±0,23	2,73±0,38	68,2±3,8
	420		0,12±0,02	10,7	13,29±0,34	5,05±0,39	62,0±2,7

Tableau 14 b : Rétraction diamétrale des rondelles de carotte séchées.

T° (°C)	t*(min)	épi (mm)	Xi b.s/ xi b.h%	Xf b.s	xf b.h%	di (cm)	df (cm)	Taux de rétraction
60°C	330	5,75	13,9/93,3	0,058	5.48	2,55±0,11	1,43±0,08	43,9±3,5
	420	8,71		0,09	8.26	3,44±0,03	1,78±0,08	48,1±2,8
	450	12,83		0,13	11.5	3,62±0,17	2,11±0,01	41,6±2,5
70°C	270	5,73		0,03	2.91	3,29±0,17	1,58±0,04	52,0±3,0
	420	8,82		0,084	7.75	3,55±0,07	2,18±0,02	38,6±1,7
	450	13,17		0,081	7.50	3,99±0,26	2,37±0,26	40,6±3,2
85°C	165	5,98		0,092	8.42	3,31±0,28	1,61±0,10	51,3±5,2
	300	8,60		0,093	8.51	3,64±0,23	2,05±0,20	43,6±8,1
	420	13,29		0,12	10.71	3,89±0,28	2,37±0,31	39,1±11,4

*Ce temps de séchage représente la durée totale de la conduite du séchage, le temps de séchage réel des rondelles peut être d'une durée plus courte obtenu avec $X_m \leq 0,1$ g/g b.s ; épi et di sont l'épaisseur initiale de découpe et le diamètre initial avant séchage épf et df sont l'épaisseur finale et le diamètre final mesurés en fin de séchage.

▪ Le taux de rétraction axiale de la petite épaisseur est moins important à 60 °C, il est de 61,2 % par rapport à celui des deux autres températures de 70 et 85 °C qui sont proches l'un à l'autre 69,2 % et 69,5 %.

Pour ce qui est du diamètre, le comportement est le même que dans l'épaisseur, la rétraction est faible à 60 °C, de 44 % seulement ; alors que pour les températures de 70 et 85 °C, elle est de 52 % et 51,3 % respectivement.

On constate que la rétraction des rondelles coupées à 5,8±0,1mm d'épaisseur évolue dans le sens axial et diamétral en même temps, mais plus dans le sens de l'axe (épaisseur) que celui du diamètre.

Ce comportement suit la même évolution que celle de la cinétique de séchage ; plus les rondelles perdent de l'eau et plus elles se rétractent, ceci est montré sur les courbes des figures 10 a, 11a et 12 a et illustré par les photos de la figure 13.

▪ Pour l'épaisseur de 8,7mm, le taux de rétraction le plus bas est noté à 70 °C avec 61,4 %. Avec les températures de 60 °C et 85 °C, il est plus élevé et presque le même, respectivement de 66,3 % et 68,2 %.

La rétraction du diamètre de ces rondelles, suit celle de l'épaisseur avec à 70 °C, un taux de 38,6 %, quand à celles séchées à 60 et 85 °C, il est plus élevé avec 48,1 % et 43,6 % respectivement.

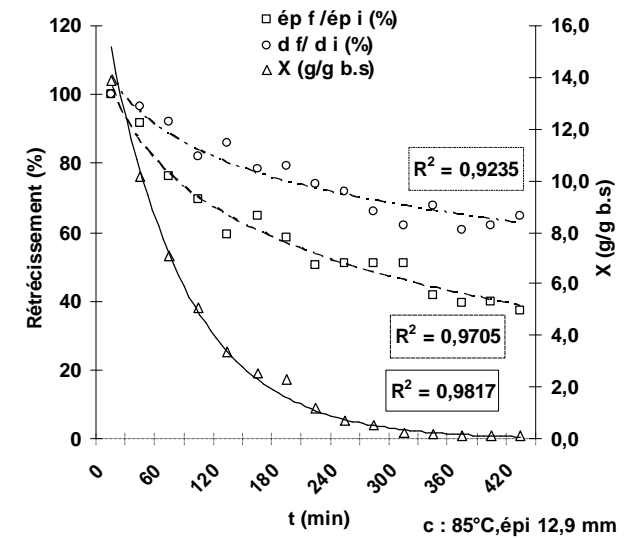
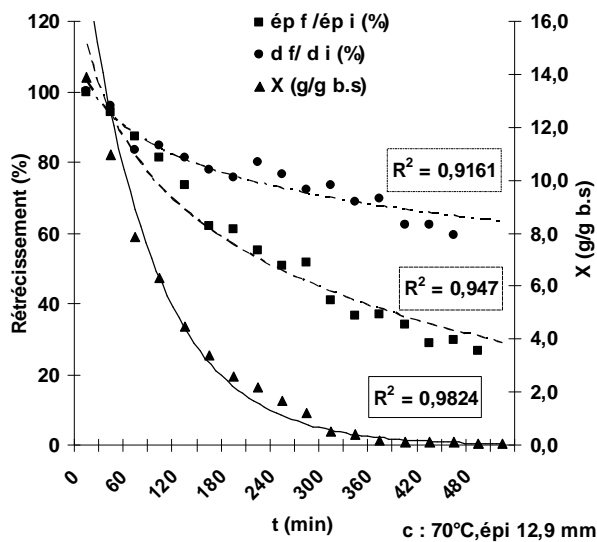
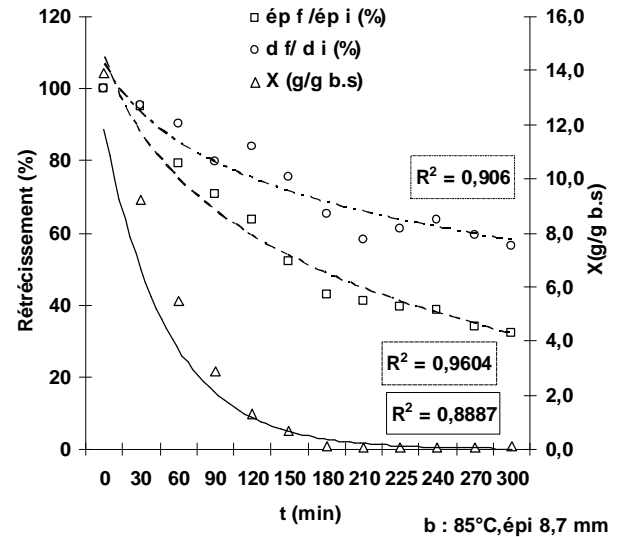
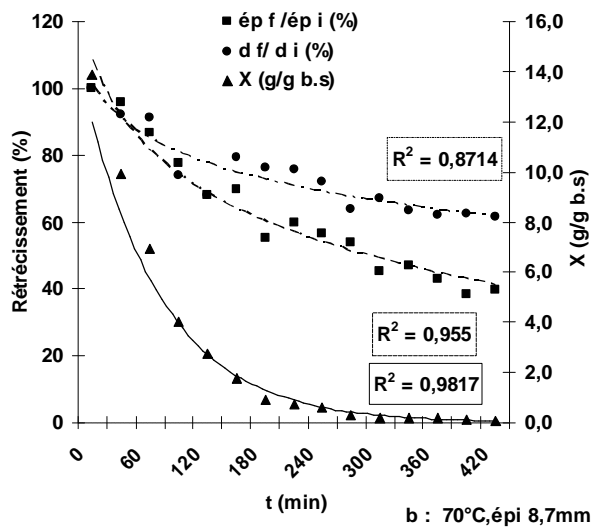
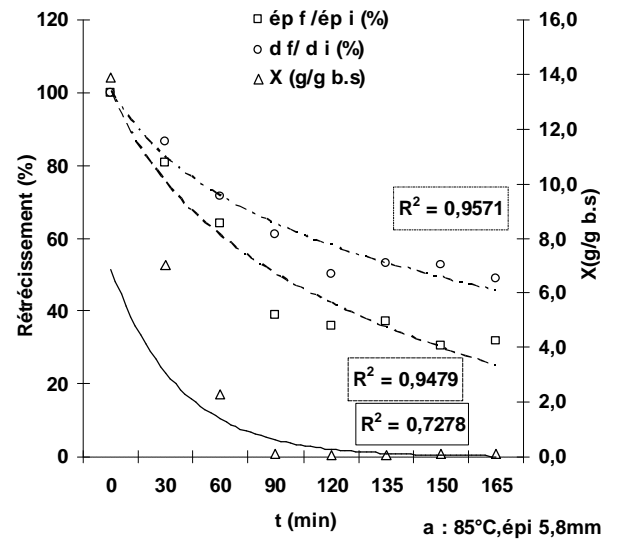
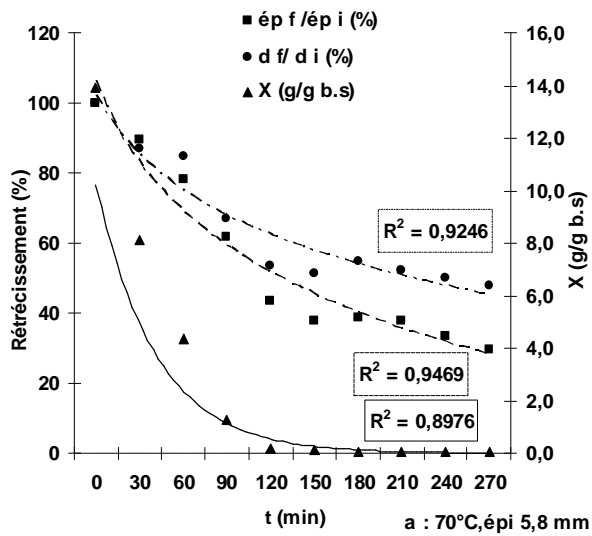


Figure 11 : Rétrécissement des rondelles de carottes séchées à 70 °C d'épi 5,8 mm(a),8,7mm (b) et 12,9mm(c),f(t)et f(X)

Figure 12 : Rétrécissement des rondelles de carottes séchées à 85 °C d'épi 5,8 mm(a),8,7mm (b) et 12,9 mm(c),f(t)etf(X)

Il est probable, avec la température 85 °C que le phénomène de durcissement provoqué par la chaleur sur les rondelles constitue le facteur limitant à la diminution à une teneur en eau assez basse et par conséquent sur la rétraction.

La rétraction se fait dans les deux sens (épaisseur et diamètre), suivant l'allure de la cinétique de séchage, mais de façon plus importante en épaisseur qu'en diamètre, ce qui apparaît sur les courbes des figures 10 b, 11 b et 12 b.

- Enfin, les taux de rétraction les plus élevés sont dans l'épaisseur de 12,9 mm pour les températures de 60 °C et 70 °C, avec des pourcentages conséquents, de 72,7 % et 73,4 % respectivement. Au contraire celui de 85 °C est de 62,0 % uniquement.

Ce dernier cas peut s'expliquer par le fait, que l'effet de la température de séchage sur le légume par la formation de croûte suite à l'assèchement des solutés avec un durcissement en surface des rondelles limite le départ de l'eau. La formation du brunissement non enzymatique sur la surface exposée à l'air sec et chaud constituant un frein avec pour conséquence une durée de séchage plus importante (420min) et une teneur en eau supérieure à 10% b.s (12% sur base sèche).

Ces rondelles étant plus épaisses avec un poids plus important (plus d'eau à éliminer), la rétraction du diamètre est presque la même pour les trois températures de séchage à 60 ; 70 et 85 °C, les taux sont respectivement de 41,6 ; 40,6 et 39,1 %.

Ceci est dû à la difficulté d'extraire la quantité d'eau permettant d'atteindre des teneurs en eau résiduelles (finales) basses en un temps plus court. La taille des morceaux de découpe limitant le déplacement de l'eau à partir du cœur vers l'extérieur du produit pour son évaporation en fin de séchage. Ce comportement apparaît sur les figures 10 c, 11 c et 12 c et est illustré par les photos (figure 13).

En fait, l'évolution de la structure physique du matériau est directement liée au mode d'évaporation et de transport interne d'eau. La création de porosité est provoquée par une évaporation interne suivie par la migration de l'eau sous forme vapeur. Au contraire, lorsque le transport d'eau a lieu sous forme liquide vers la surface, le produit a tendance à rétrécir proportionnellement au volume d'eau évaporée, dans la mesure où la résistance mécanique du matériau sec le permet (BIMBENET et coll., 2002b). Cette résistance est remarquée chez les rondelles les plus épaisses de la carotte séchée à la température de 85 °C.

DO AMARAL et coll. (2001) rapportent, lors l'étude de l'effet du séchage sur le rétrécissement de cubes de pomme de terre, que le volume de ces derniers diminue d'une façon linéaire avec la teneur en eau du produit jusqu'à 80% de perte d'eau.

Le rétrécissement et la porosité sont des propriétés physique importantes qui ne peuvent être ignorées dans un processus de séchage, spécialement pour les produits ayant une teneur en eau initiale élevée (MAY et PERRE ,2002).

L'effet de la température sur le taux de rétraction est important sur les rondelles de petite épaisseur où il croit proportionnellement à la température. Le même effet est noté sur le taux de rétraction du diamètre.

Dans le cas de l'épaisseur moyenne, il est moins important puisque à 70 °C, le taux est inférieur à celui de 60 °C .Le même comportement est noté pour le taux de rétraction du diamètre .

Quand aux rondelles les plus épaisses, l'effet de la température est inversé où à 85 °C le taux de rétraction est le plus faible par rapport aux deux autres températures, ce qui est du aux effets de la chaleur qui affecte la qualité du produit . L'effet sur le taux de rétraction du diamètre est inversement proportionnel à la température, il diminue quand la température augmente.

L'effet de l'épaisseur de découpe sur le taux de rétraction montre, au vu du comportement des rondelles séchées à 60 °C, que l'effet est important, il augmente proportionnellement à la taille de découpe ; la plus petite assure un taux de rétraction moins important que celui de l'épaisseur moyenne qui lui-même est inférieur à celui de la plus épaisse des découpes.

A 70 °C, l'effet est noté entre la petite épaisseur et celui de la plus épaisse. L'épaisseur moyenne donne un taux de rétraction moindre par rapport à celui des deux autres épaisseurs.

L'effet de l'épaisseur de découpe sur le taux de rétraction est inversement proportionnelle à la taille des rondelles séchées à 85 °C où la plus petite épaisseur assure le taux le plus élevé suivi par l'épaisseur moyenne et le plus faible taux est assuré par la plus épaisse des découpes.

Ce paramètre ne montre aucun effet significatif sur le taux de rétraction du diamètre.

2-3-2-Changement de couleur et de forme au cours du séchage

Les photos prises lors du suivi des cinétiques de séchage montrent l'aspect des rondelles et le changement de couleur du légume à partir d'une certaine durée d'exposition à l'air en fonction de la température (figure 13).

L'évolution des rondelles de carottes séchées à 85 °C, aux 3 épaisseurs est illustrée par les photos qui montrent le début de changement d'aspect (rétrécissement) et celui de la couleur.

Au cours du séchage, les rondelles de carotte ont présenté une déformation lors du rétrécissement en se courbant, et une déformation au niveau du pourtour de la rondelle. Ceci est dû à l'effet de la température de séchage avec le départ de l'eau par évaporation laissant du vide dans les pores du légume. Cet aspect est surtout observé sur les rondelles ayant un grand diamètre avec une grande surface d'exposition à l'air de séchage avec les températures de 70 et 85 °C.

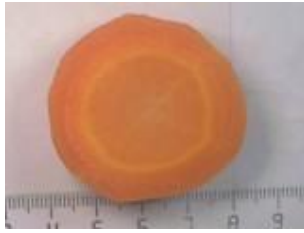
Celles qui ont les épaisseurs de $8,7\pm 0,3$ mm et $12,9\pm 0,3$ mm subissent plus de déformation avec un léger changement de couleur ; du au brunissement non enzymatique qui apparaît sous l'influence de la durée de séjour et d'exposition. La température de 85°C a un effet plus important que celle de 70°C et de 60°C. Le brunissement est donc plus important sur les rondelles les plus épaisses.

Quand au rétrécissement, il apparaît au bout de 60 min de séchage et il est plus important chez les rondelles les moins épaisses étant donnée qu'elles perdent leur eau plus rapidement. Le vide laissé par le départ de l'eau permet au tissu végétal de rétrécir et de se déformer en fonction du temps et au fur et à mesure que le contenu en eau diminue. La teneur en eau à cet instant est inférieure à 50% par rapport à la teneur initiale, c'est à dire plus que la moitié de la quantité d'eau s'est évaporée.

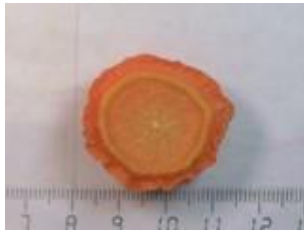
Dans cet essai à 85°C, il apparaît un rétrécissement avec déformation des rondelles à 2 h avec une teneur en eau <5% b.h pour l'épaisseur de $5,8\pm 0,1$ mm ; sur celles de $8,7\pm 0,3$ mm, c'est à 3 h que la déformation est nette. Enfin chez la rondelle d'épaisseur de $12,9\pm 0,3$ mm de durée de séchage plus longue, la courbure et la déformation se manifestent à partir de 3 h et continuent jusqu'au séchage final avec un brunissement plus intense.

Les produits séchés sont caractérisés par une faible porosité (KROKIDA & MAROULIS, 1997 cités par KROKIDA et coll. 2003). Un changement de couleur significatif arrive durant le séchage par air (KROKIDA, TSAMI & MAROULIS, 1998 cités par KROKIDA et coll.2003).

A cela s'ajoute de très fortes concentrations de solutés à la surface, observées par BIMBENET et coll. (1970) cités par BIMBENET (1984), avec pour effet probable d'obstruer les pores du produit permettant la sortie de l'eau. Nous constatons que la différence de la durée de séchage entre les rondelles des trois épaisseurs étudiées montre des changements de couleur et des déformations différentes croissantes de façon proportionnelle à l'épaisseur.



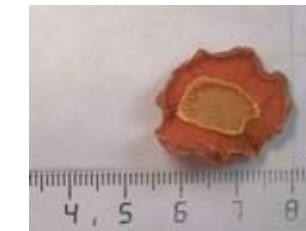
ép12,9mm à t₀; Xi=13.7g/g bs ép.8,7mmàt₀;Xi=13.7g/g b.s ép5,8mmàt₀;Xi=13.7g/g b.s



A 60min (12,9mm) X=4,86 60min (8,7mm) X=3,12 60min (5,8mm) X=3,444



A180min (12,9mm) X=2,469 120min (8,7mm) X=0,271 120min (5,8mm) X=0,124



A 240min (12,9mm)X=1.216 180min (8,7mm)X=0.187 180min (épi 5,8mm); X= 0.017



A 300min (12,9mm) X=0.106 240min (8,7mm) X=0.068

Figure 13 : Photos du suivi des changements de couleur et de forme des rondelles de carotte séchées à 85°C (épi 5,8 ; 8,7 et 12,9mm)

2-4- Aptitude à la réhydratation de la carotte séchée et reprise de la forme

Les aliments séchés font particulièrement partie intégrante de diverses soupes et de produits prêts à l'emploi. L'augmentation de la demande des consommateurs pour des produits alimentaires ayant une réhydratation rapide est une considération de qualité significative. Mieux comprendre les phénomènes de transfert survenant au cours du séchage des aliments a une particularité à faciliter la reconstitution du produit (SAM SAGUY et coll. 2005).

Pour répondre à ces attentes nous entamons cette étape de notre travail qui consiste à tester les aptitudes des produits séchés à se réhydrater. Nous présenterons l'effet de la température de séchage et de l'épaisseur de découpe sur les allures de l'évolution du taux de réhydratation avec les photos montrant le légume sec et son changement au cours de la réhydratation.

Les rondelles de carotte utilisées pour ce test ont été séchées quatre mois auparavant, à une teneur en eau finale comprise entre 0,024 à 0,148 (g/g b.s) ,conservées dans des sachets cellophane et thermo soudés. La perte de poids des rondelles durant ce conditionnement est en moyenne de 0,0653g (6,53%).

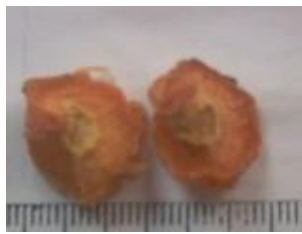
Au bout de 3h d'absorption d'eau, le volume d'eau dans lequel les rondelles (de 5,8 ; 8,7 et 12,9 mm d'épaisseur) ont été mise en contact pour réhydratation s'est épuisé ,de l'eau distillée a été rajouté à raison de 5ml par boîte de Pétri. Le pH de l'eau de réhydratation, à 27,7 °C est de 5,84. L'expression visuelle du comportement du produit au cours de la réhydratation est représentée par l'ensemble des photos ci-dessous (figure 14) prises lors du test.

Il est observé un passage des substances dissoutes dans l'eau de réhydratation qui s'est colorée en jaune orange, vraisemblablement due à la dissolution et diffusion des pigments caroténoïdes de la carotte (provitamine A).

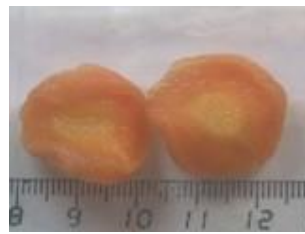
Les rondelles séchées à 60 °C, l'épaisseur de 12,9±0,3 mm est plus colorée que les deux autres dont la couleur est moins intense. Celles séchées à 70 °C sont légèrement colorées avec reprise de la couleur initiale.

Pour celles de 85 °C, avec l'épaisseur de 12,9±0,3 mm, il y'a coloration de l'eau en brun, due au brunissement des rondelles lors du séchage, et chez les autres rondelles, on observe une coloration de l'eau en jaune orange.

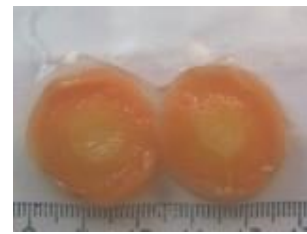
Au cours du séchage les produits se ternissent en général, probablement par concentration des pigments. Après dilution de ces derniers au cours de la réhydratation, l'aspect du produit s'éclaircit et donne de la brillance à la coloration. L'épaisseur des rondelles après réhydratation est donnée dans le tableau 16. On note la reprise de l'épaisseur initiale et de la couleur.



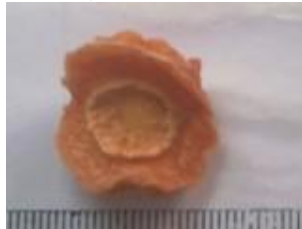
60°C/5,8mm à t₀



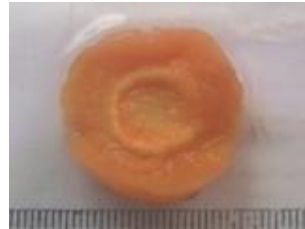
60°C/5,8mm à t 180min



60°C/5,8mm à t 360min



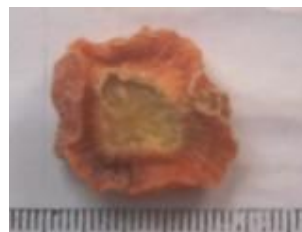
60°C/8,7mm à t₀



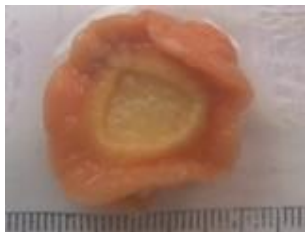
60°C/8,7mm à t 180min



60°C/8,7mm à t 360min



60°C/12,9mm à t₀

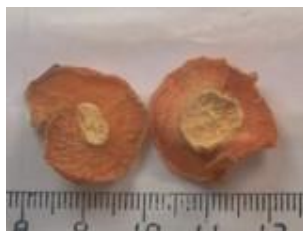


60°C/12,9mm à t 180min

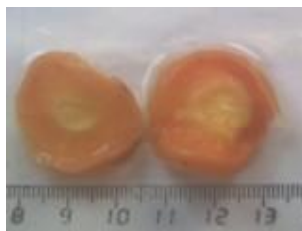


60°C/12,9mm à t 360min

a- Réhydratation des rondelles de carottes séchées à 60°C coupées en 3 épaisseurs



70°C / 5,8 mm à t₀



70°C/5,8 mm à t 180min



70°C/5,8 mm à t 360min



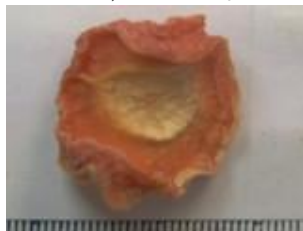
70°C / 8,7 mm à t₀



70°C/8,7 mm à t 180min



70°C/8,7 mm à t 360min



70°C / 12,9 mm à t₀



70°C/12,9mm à t 180min



70°C/12,9mm à t 360min

b- Réhydratation des rondelles de carottes séchées à 70°C coupées en 3 épaisseurs

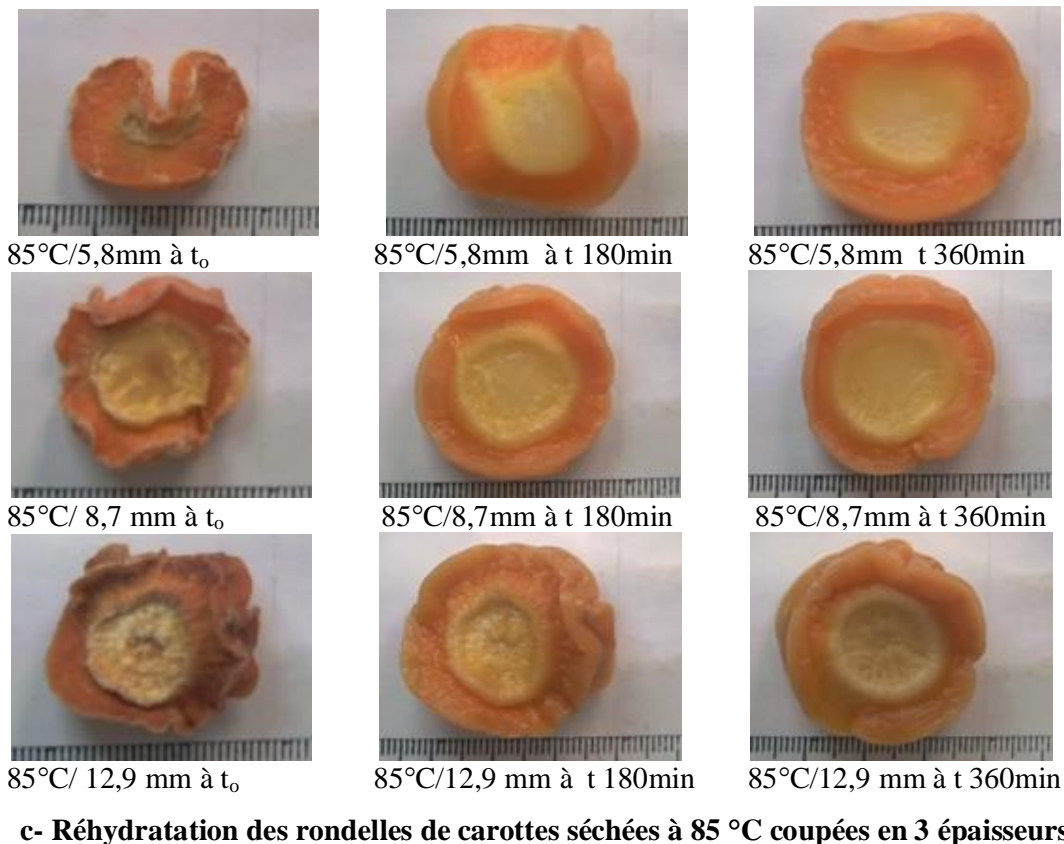


Figure 14 : Evolution de la réhydratation des rondelles de carotte séchées à 60 °C (a) ; 70 °C (b) et 85 °C (c) coupées aux 3 épaisseurs.

Cependant la déformation ne disparaît pas totalement, ceci est observé sur la majorité des rondelles à l'exception de celles de $5,8 \pm 0,1$ mm séchées à 60 °C et à 70 °C, où la récupération de la forme est presque totale mais pas complète (voir photos ci-dessus), due au taux de réhydratation qui est élevé avec 88,0 et 80,5% respectivement. La reprise de la forme est observée également sur les rondelles de 8,7 mm séchées avec les mêmes températures malgré leur taux de réhydratation respectifs qui sont moins importants avec 60,0% et 39,1%. Le comportement de ces rondelles est probablement, du au fait qu'elles n'ont pas été altérées par la température lors du séchage qui est relativement moins agressive que 85 °C.

HATAMIPOUR et MOWLA (2002) qui ont suivi le rétrécissement des carottes, séchées dans un sécheur à lit fluidisé, découpées en cylindre de diamètre compris entre 8 et 12,5 mm avec une longueur de 4 à 7, 5cm, suggèrent qu'un séchage doux n'entraîne qu'une légère déformation et qu'en général, l'intégrité de la structure cellulaire se comporte de façon différente selon la vitesse à laquelle l'eau quitte les cellules. Ces suggestions réconfortent nos

observations sur les carottes séchées à 60°C et 70°C à propos de l'intensité de la déformation et de l'éventuelle altération des tissus de la carotte.

TAKAHABASHI, HÄGGKVIST & LI (1997); cités par SAM SAGUY et coll. (2005) ont montré que l'absorption d'eau dans une matrice fibreuse suit deux processus différents ; pénétration dans les capillaires entre les fibres, et diffusion de l'eau à l'intérieur des fibres de cellulose. L'avancement du front du liquide est déterminé en premier par le flux de l'eau capillaire. La lenteur du processus de diffusion est le principal responsable du gonflement des fibres.

Des carottes congelées et séchées par SAM SAGUY et coll. (2005), jusqu'à une humidité résiduelle de 3% sur base humide, et mises dans une jarre jusqu'à réhydratation. Leurs résultats de la réhydratation ont montrés que l'imbibition capillaire révèle une cinétique de deux régions distinctes. La première partie est linéaire définit l'imbibition linéaire du liquide par les capillaires et la seconde montre la saturation. Le gonflement des carottes séchées durant le processus de la prise d'eau peut être responsable d'un changement continu dans la distribution de la taille des pores. Pour le tissu des carottes, il est trouvé que le xylème et le phloème participent activement dans le mécanisme hydrodynamique des transferts de masse (GRAS, VIDAL, BROTONS, BETORET, CHIRALT & FITO, 2002; cités par SAM SAGUY et coll. 2005).

SAM SAGUY et coll.(2005), expliquent que la progression de l'eau se fait d'abord à travers le xylème fibreux composé de cellules micro fibrillaires, ce qui n'est pas attendu à contribuer significativement au gonflement de l'échantillon séché. Ainsi le fluide est attendu à progresser à l'intérieur du tissu du phloème, qui peut gonfler. L'étude de la forme asymptotique du processus de gonflement du phloème montre que les valeurs diminuent avec l'augmentation en hauteur aussi bien que les vitesses sont constantes. La même allure est observée pour les paramètres dérivant de la progression de l'eau à l'intérieur du xylème. Il est mis en valeur que la phase initiale de la réhydratation et de la succion capillaire est importante.

Dans le cas de la réhydratation de notre carotte nous observons les mêmes phénomènes précités, à savoir, l'allure asymptotique. En divisant les courbes d'évolution en deux sous phases, nous pouvons constater qu'en début de réhydratation la vitesse d'absorption d'eau est rapide et en progression continue. Le changement de l'allure de la pente est observé à partir de 180 min (3h) où, la vitesse de réhydratation devient constante. Nous pouvons alors assimiler ce comportement à une absorption capillaire en début et la deuxième sous phase à une

diffusion progressive lente aboutissant au gonflement du produit avec une quasi-récupération de la forme et la taille initiales du légume.

La récupération de la forme et de l'épaisseur des rondelles est probablement due à la participation active du phloème et du xylème. Ce dernier, riche en fibres, représente 41,4±4 % (rapport du diamètre du xylème/diamètre du phloème) permettant ainsi le gonflement du tissu de la carotte.

2-4-1- Effet de la température sur la capacité de réhydratation de la carotte

L'évolution de l'absorption d'eau de la carotte à partir de laquelle les teneurs en eau sont tirées pour, exprimer la réhydratation du légume séché en taux de réhydratation par rapport à la teneur en eau initiale ($X_i=13,9$ g d'eau/g de m.s soit $x_i= 93,29\%$ b.h), calculé à partir des teneurs en eau qui évoluent dans le temps, permet de tracer les courbes d'évolution de la réhydratation du légume. Les teneurs en eau et épaisseur finales des rondelles après séchage et après réhydratation (X_{fsec} , $X_{réh}$, ép f séc, ép f réh), avec leur taux de réhydratation final, sont résumés dans le tableau n° 15.

Tableau 15 : Taux de Réhydratation (TR) de la carotte (à $26\pm 2^\circ\text{C}$) en fonction de la température de séchage et de la taille de découpe.

T° de séchage	épi de découpe (mm)	temps de séchage (min)	mmoy.de 3 rondelles sèches (g)	ép f sec (mm)	épf réhyd (mm)	X f séché (g/g)	$X_{réh}$ (g/g)	TR= $X_{réh}/X_i*100$ (%)
60°C	5,8±0,1	225	0,29±0,01	2,27	5,0	0,068	12,23	88,0±0,4
	8,7±0,3	480	0,34±0,07	2,65	8,6	0,051	8,35	60,3±2,3
	12,9±0,3	480	0,66±0,01	3,3	11,4	0,066	6,06	44,2±0,9
70°C	5,8±0,1	300	0,36±0,03	2,37	5,0	0,075	11,19	81,4±4,4
	8,7±0,3	330	0,87±0,06	2,75	-	0,138	5,43	40,0±1,2
	12,9±0,3	420	1,18±0,20	3,5	-	0,078	3,86	28,2±2,4
85°C	5,8±0,1	135	0,35±0,03	2,2	-	0,051	5,75	41,5±1,3
	8,7±0,3	255	0,65±0,04	3,85	-	0,066	4,29	31,0±0,5
	12,9±0,3	370	1,00±0,15	4,0	-	0,106	4,05	29,9±2,2

En séchage classique par air chaud, selon JAYARAMAN et DAS GUPTA (1995) cités par BIMBENET et coll. (2002 b) les séchages les plus rapide conduisent aux meilleures réhydratations et dans tous les cas, le taux de réhydratation est en bonne partie lié à la dénaturation des protéines, elle même fonction des couples temps-températures atteints pendant le séchage.

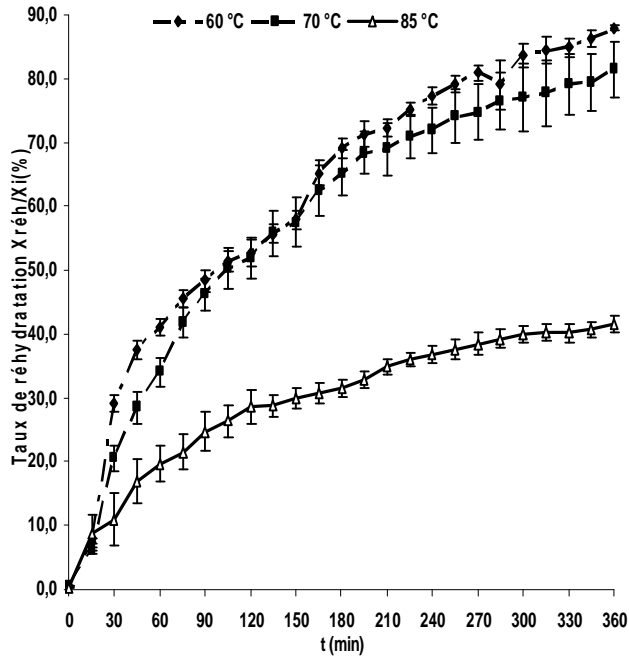
Dans le cas de nos échantillons (figure 16 a), la meilleure capacité de réhydratation (près de 90 %) est assurée par la température de séchage la plus faible, celle de 60 °C avec 88,0 %, une durée de séchage de 225 min (3h15min) et une teneur en eau finale $X_f = 0,068$ g/g (6,37 % b.h). Ensuite vient celle de 70 °C avec un taux de réhydratation tout aussi élevé de 81,4 %, d'une durée de séchage de 300 min (5 h) et une teneur en eau finale de 0,075 g/g (6,97% b.h) Enfin le plus faible taux de réhydratation est obtenu par la température de séchage de 85°C qui est de 41,5 %, d'une durée de séchage de 135 min (2h15min) et $X_f=0,051$ g/g (4,85% b.h).

Les taux de réhydratations de la figure 16 b sont moins intéressants. La température de 60°C assure un taux de réhydratation de 60,3 % avec une durée de séchage de 480 min (8h) et $X_f=0,051$ g/g (4,85 % b.h). Les deux températures de 70 et 85°C donnent des taux de réhydratation faibles de 40,1 et 31,0 % respectivement avec des durées de séchage de 330 et 255 min (5h 30min et 4h15min) et des X_f respectives de 0,138 et 0,066 g/g (12,13 et 6,19 % b.h).

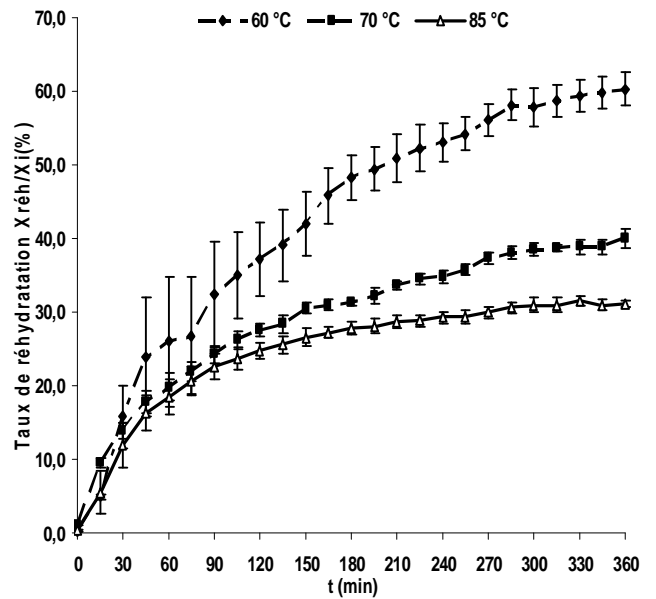
Les taux de réhydratation observés sur les courbes de la figure 16 c sont les plus faibles et sont respectivement de 44,2 ; 28,2 et 29,9 % pour les températures de 60 ; 70 et 85 °C avec des durées de séchage de 480 ; 420 et 370 min (8h ; 7h et 6h 10min) dont les X_f sont de 0,066 ; 0,078 et 0,106 g/g (6,19 ; 7,24 et 9,58 à b.h).

Ceci nous amène à dire que l'effet de la température de séchage sur le taux de réhydratation est plus important du point de vue altération de la structure du produit. La dénaturation des protéines est probablement moindre dans la carotte (dont la teneur n'est pas assez importante, de 0,7 à 1,2 g/100g selon SOUCI et coll. (1994) ; FAVIER et coll. (1995) et VILLENEUVE (1999) par rapport aux glucides) quand le produit reste moins de temps exposé à l'effet de la chaleur, autrement, il est probable qu'il existe une durée de séjour limite à partir de laquelle les altérations apparaissent, au vu des résultats obtenus.

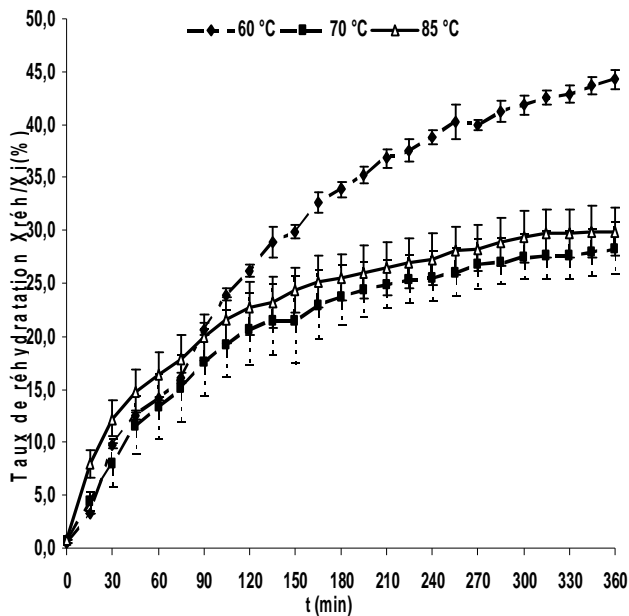
COLAS (2003), rapporte que diverses modifications subies par les protéines de la membrane et par les substances pectiques de la paroi de la lamelle moyenne. A l'opposé, en raison des structures très ordonnées de la cellulose et la lignine, les tissus à paroi secondaire et les tissus lignifiés subissent peu de ramollissement, ceci est probablement valable pour notre carotte qui n'est pas assez doté en fibres sauf probablement au niveau du xylème, et dont les modifications ont été importantes lors du séchage des rondelles à température élevée qui n'ont pas donné des taux de réhydratation conséquents.



a - Effet de la température de séchage sur la réhydratation des rondelles de carotte de 5,8 mm d'ép



b : Effet de la température de séchage sur la réhydratation des rondelles de carotte de 8,7 mm d'ép



c : Effet de la température de séchage sur la réhydratation des rondelles de carotte de 12,9 mm d'ép

Figure 16 : Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation des rondelles de carotte d'épaisseurs moyennes de 5,8 mm (a) ; 8,7 mm (b) et 12,9 mm(c)

2-4-2- Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de la carotte

Les figures 17 a à 17 c, montrent l'effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation. Il apparaît que la dimension du légume séché a une influence significative sur l'allure de la réhydratation. Les courbes sont bien distinctes d'une épaisseur à une autre et ont donné des taux de réhydratations différents.

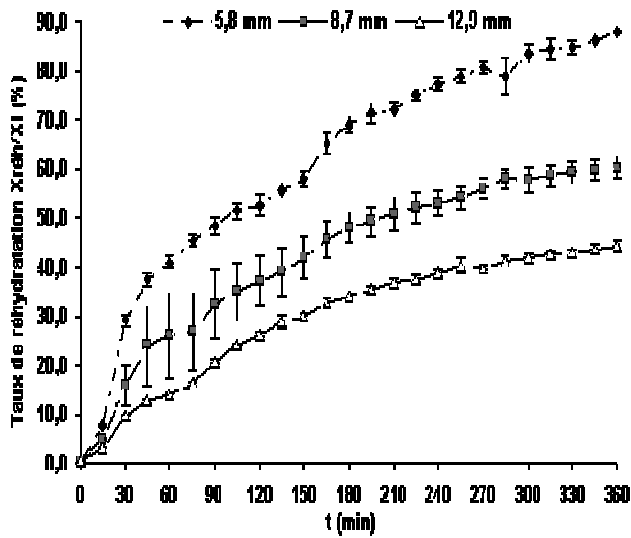
Les rondelles de la petite épaisseur ($5,8 \pm 0,1$ mm) sont celles qui ont donné les taux de réhydratation les plus élevés de 88,0 et 81,4% à 60 et 70°C respectivement, dont la durée du temps de séjour est plus longue qu'avec 85 °C qui elle, présente un taux de réhydratation faible de 41,5% (voir tableau 15).

Les plus faibles taux de réhydratation sont ceux des rondelles les plus épaisses (12,9 mm) séchées avec les trois températures respectivement de 44,2 ; 28,2 et 29,9 %, à l'inverse pour l'épaisseur de 8,7 mm à 60°C qui assure un taux de réhydratation relativement intéressant de 60,3%. Quand à ceux obtenus avec les températures de 70 et 85 °C, leurs taux sont proches de celles de 12,9 mm séchées avec les mêmes températures et sont 40,0 et 31,0 %.

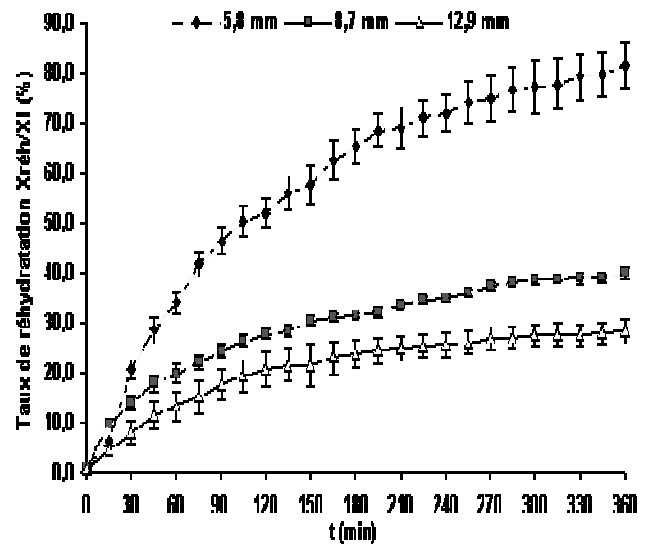
Dans tout les cas de figure, l'épaisseur la plus faible a donné les taux de réhydratation les plus élevés, suivi de celle de 8,7 mm et enfin les faibles taux de réhydratations sont ceux de 12,9 mm qui paraît la moins intéressante des trois épaisseurs.

L'effet de l'épaisseur est très significatif dans la mesure où la plus petite épaisseur (5,8mm) assure les taux de réhydratation les plus élevés par rapport à celle qui lui est supérieure (8,7mm). Cette dernière assure des taux plus élevés que l'épaisseur la plus large (12,9 mm). Les courbes de réhydratation évoluent distinctement l'une de l'autre pour les températures de séchage de 60 et 70 °C malgré des écarts type assez importants (cas de l'épaisseur 8,7 mm à 60 °C en début de réhydratation). À 85 °C l'effet est moins significatif surtout pour les épaisseurs de 8,7 et 12,9 mm.

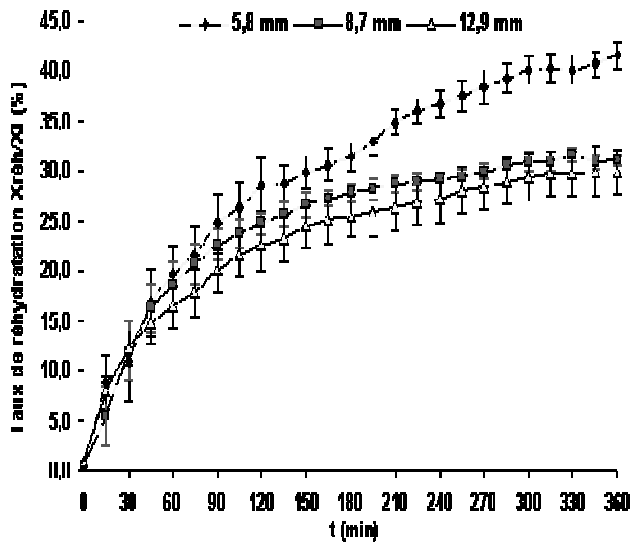
KOMPANY et coll. (1990), dans leur travail avec un nouveau procédé de déshydratation des fruits et légumes à réhydratation rapide, les dimensions des carottes sont de (10x10x3 mm³), blanchi à la vapeur pendant 8 à 12 min suivi d'une détente, séchées à 80°C sous vide de 20 mmHg. Leur résultat de la réhydratation de la carotte, par trempage dans l'eau bouillante, ils ont trouvé que la capacité est de 75% au bout de 2 min, et une capacité totale de



a : Effet de l'épaisseur sur la réhydratation des rondelles de carotte séchées à 60°C



b : Effet de l'épaisseur sur la réhydratation des rondelles de carotte séchées à 70°C



c : Effet de l'épaisseur sur la réhydratation des rondelles de carotte séchées à 85°C

Figure 17 : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation des rondelles de carotte séchées à 60 °C (a) ; 70 °C (b) et 85 °C (c).

réhydratation de 85 %, contrairement avec le séchage par air chaud ,ces capacités de réhydratation sont respectivement de 45 % et de 60 % .

Sur le plan de la qualité, les caractéristiques du produit sont satisfaisantes, l'aspect du produit est excellent (couleur et forme). Nos résultats obtenus avec des conditions différentes de ces auteurs sont assez satisfaisants avec des taux de réhydratation pour la petite épaisseur qui sont supérieurs à 80 % avec les rondelles séchées à 60 et 70 °C.

Conclusion:

Les résultats auxquels nous sommes parvenus sont confortés par ce qui est rapporté par KROKIDA, MAROULIS, TSAMI & MARINO-KOURIS (1997) cités par KROKIDA et coll. (2003) à propos de l'utilisation fréquente du séchage par air conventionnel dans les opérations de déshydratation dans les industries alimentaires, et le fait que la cinétique de séchage soit influencée de façon importante par la température de l'air et les caractéristiques de dimension du produit.

Le séchage de la carotte montre que l'effet de l'épaisseur ainsi que celui de la température de séchage, sur l'altération du produit et le temps de séjour de ce dernier, sont des facteurs déterminants sur la cinétique, la vitesse de séchage et également sur le taux de rétraction et l'aptitude du produit à se réhydrater.

L'effet de la température est plus important sur le taux de rétraction de l'épaisseur la plus mince (qui a moins rétréci) à 60 °C, celui de l'épaisseur est plus significatif lors du séchage à la même température sur les trois épaisseurs.

L'échantillon plus épais utilise plus d'énergie que celui qui est mince, ceci reflète la faible capacité de réhydratation et un temps plus lent pour sécher les échantillons plus épais. De même pour la rétraction (diminution de l'épaisseur) qui conduit à une augmentation de l'énergie nécessaire pour le transfert de l'eau (WANG et XI ,2004). Ceci corrobore les effets observés sur les rondelles épaisses par leur brunissement et l'altération éventuelle du tissu qui conduit à un faible taux de réhydratation et les résultats prometteurs obtenus avec l'épaisseur la plus mince séchée à 60 et 70 °C.

Cependant à 60 °C l'épaisseur moyenne a assuré un taux de réhydratation intéressant plus de 60 %. Mais celle de 70 °C a moins rétréci par rapport aux deux autres épaisseurs et a donné un taux de réhydratation de 40 % seulement.

D'après les résultats obtenus des cinétiques de séchage de la carotte et l'étude de son comportement au cours et après séchage, nous pouvons conclure qu'il existe une interrelation entre la température de l'air et l'épaisseur du produit et leurs effets cumulés sur la durée et la vitesse de séchage, le taux de rétraction et leurs conséquences sur la capacité de réhydratation des légumes séchés.

3- Séchage et comportement de la courgette

3-1- Cinétique de séchage

3-1-1-Effet de la température sur la vitesse de séchage

Le résultat de l'effet de la température de séchage sur la cinétique des vitesses de séchage des rondelles de courgette est exprimé par des courbes, montrant l'influence de ce paramètre sur le comportement de chaque rondelle en fonction de sa dimension.

Les figures 18a, 19a et 20a représentant l'évolution de la cinétique $X_m=f(t_m)$ sont présentées en annexe 1.

Les figures 18 (b et c), 19 (b et c) et 20 (b et c) de la vitesse de séchage ($-dX/dt$ en fonction de t_m et en fonction de X_m) de la courgette montrent l'effet de chaque température de séchage (60 ; 70 et 85°C) sur chacune des trois épaisseurs de rondelles découpée (5,7±0,2; 8,4 ±0,4 ou 12,3±0,4 mm) .

L'allure générale des courbes de cinétique et des vitesses de séchage (figures 18, 19 et 20) montre que le séchage se déroule en phase décroissante en l'absence de la période de mise en température et de la période à allure constante. Ce phénomène est rapporté en littérature à propos des produits alimentaires, notamment les légumes.

La présence d'une seule phase à allure décroissante montre qu'elle peut être subdivisée en deux ou trois sous périodes selon la température de l'air et l'épaisseur des rondelles.

►► Sur les figures 18 b et 18c de l'épaisseur 5,8mm, les courbes démarrent au temps initial ($t_{mi} = 5\text{min}$) avec des vitesses initiales ($-dX/dt)_i$ de séchage différentes où celle de 85 °C est la plus élevée avec 14,7 g d'eau/g m.s/ h correspondant à une teneur en eau initiale X_{mi} de 12,68 g/g b.s (92,69 % b.h), suivie par celle de 70 °C avec 14,46g d'eau/g m.s/h et une X_{mi} de 14,46 g/g b.s (93,53 % b.h) et enfin la température 60 °C a la plus faible vitesse initiale de 11,7 g/g m.s/h correspondant à X_{mi} de 12,73 g/g b.s (92,72 % b.h).

Au cours du séchage les trois courbes de 60 °C ; 70 °C et 85 °C évoluent de façon séparée du début du séchage jusqu'au basses teneurs en eau. Dans la figure 18 b, il apparaît que les courbes de 70 et 85 °C se rapprochent au début du séchage sans se confondre où l'effet de la température s'atténue quelque peu jusqu'à $t_m = 45\text{min}$ où l'effet de la température s'accroît. Cette partie montre que le séchage se déroule à des vitesses rapprochées, ensuite la décroissance devient plus rapide à 85 °C qu'à 70 °C. Au contraire sur la figure 18 c, il apparaît que les trois courbes évoluent séparément à des vitesses et teneurs en eau différentes

montrant l'importance de l'effet de la température de l'air sur ces rondelles jusqu'aux basses teneurs en eau résiduelles à la fin du séchage.

► La courbe de séchage à 60 °C, montre qu'à Δt_1 2h 55min (175 min), les rondelles atteignent la teneur en eau moyenne sur base sèche <10 g/g b.s, $X_{m1}=0.067$ g/g b.s (6,28 % sur b.h). Cette durée a été suffisante pour éliminer ΔX_{m1} de 12,66 g d'eau /g de masse sèche soit 92,68 % sur base humide de la totalité de l'eau contenue dans la carotte. La teneur en eau moyenne finale est atteinte après 2 h (120 min) de plus pour éliminer 3,3 % b.s (3,19 % b.h) d'eau restante de X_{m1} jusqu'à $X_{mf} =0,034$ g/g b.s (3,29 % b.h). Le temps Δt_t de 4 h55 min (295 min) correspond à l'évaporation de ΔX_{mt} 12,69 g d'eau /g de m.s soit 92,69 % b.h (g d'eau évaporée par 100 g de masse humide) au cours du séchage de ces rondelles de courgette de 5,7 mm d'épaisseur.

► La courbe de séchage à 70 °C, montre qu'à Δt_1 2h 55min (175min) les rondelles atteignent la teneur en eau $X_{m1}=0,095$ b.s (8,68 % b.h) avec une évaporation de ΔX_{m1} de 14,36 g/g b.s (93,49 % b.h) .La teneur en eau moyenne finale X_{mf} de 0,038 g/g b.s (3,66 % b.h) est atteinte après 2h (120min) de plus pour évaporer 5,7% b.s (5,39 % b.h). Le temps Δt_t de 4h55min (295min) a permis une évaporation de ΔX_{mt} de 14,42 g/g b.s soit 93,51 % b.h (g d'eau évaporée par 100 g de masse humide) au cours du séchage de ces rondelles de carotte de 5,7 mm d'épaisseur.

► La courbe de séchage à 85 °C, montre que la teneur en eau ciblée est atteinte après Δt_1 de 2h 25 min (145 min) de séchage seulement avec $X_{m1}=0,097$ g/g b.s (8,84 % b.h) et l'évaporation de $\Delta X_{m1}=12,58$ g/g b.s soit 92,64 % sur base humide. La teneur en eau X_{mf} de 0,04 g/g b.s (3,85 % b.h) est atteinte avec une durée supplémentaire de 30min pour extraire 5,7 % sur b.s soit 5,39 % b.h. Le temps total Δt_t pour extraire ΔX_{mt} de 12,64 g/g b.s soit 92,67 % d'eau sur base humide est de 2h 55min (175min) au cours du séchage de ces rondelles de courgette de 5,7 mm d'épaisseur.

► Le changement de pente est observé (figure 18 b et 18c) à 65min (60 et 70 °C) et à 55min (85 °C) de séchage, il correspond à X_m de 4,18 ; 3,55 et 2,93 g/g b.s (80,69 ; 78,02 et 74,55 % b.h) et à une vitesse de 5,7 ; 7,8 et 8,1 g d'eau/g m.s/h respectivement. Ces points correspondent à l'évaporation de 8,55 ; 10,91 et 9,75 g/g b.s soit 89,53 ; 91,6 et 90,7 % sur base humide.

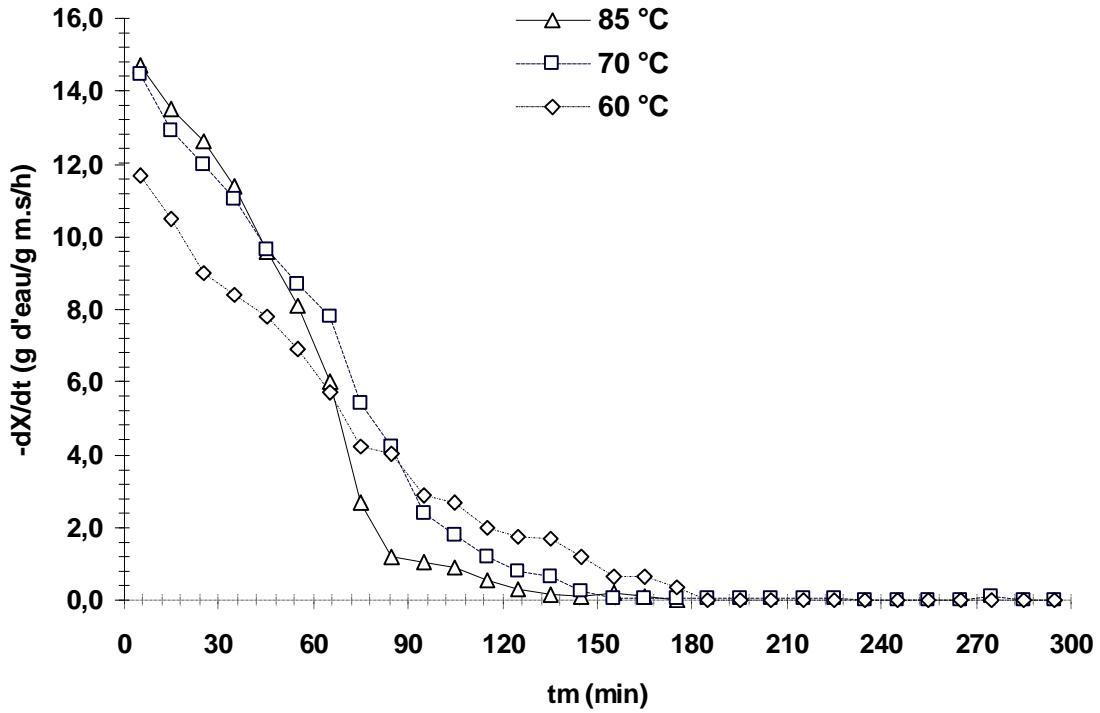
La vitesse de séchage montre une évaporation plus élevée au début avec $(-dX/dt)_i$ élevée jusqu'au point d'inflexion avec changement de l'allure de la courbe et abaissement de la vitesse au fur et à mesure que la teneur en eau résiduelle diminue.

La diminution de la quantité d'eau évaporée à partir du point d'inflexion, ainsi que la faible vitesse à ce niveau, nécessite une durée plus longue pour éliminer de faibles quantités d'eau jusqu'à X_{mf} qui est de 3h 20min (230min) à 60 et 70 °C et 2h (120min) à 85 °C. Ce temps correspond à 78,0 ; 68,6 de la durée totale respective (60 et 70 °C , et 85°C) du séchage.

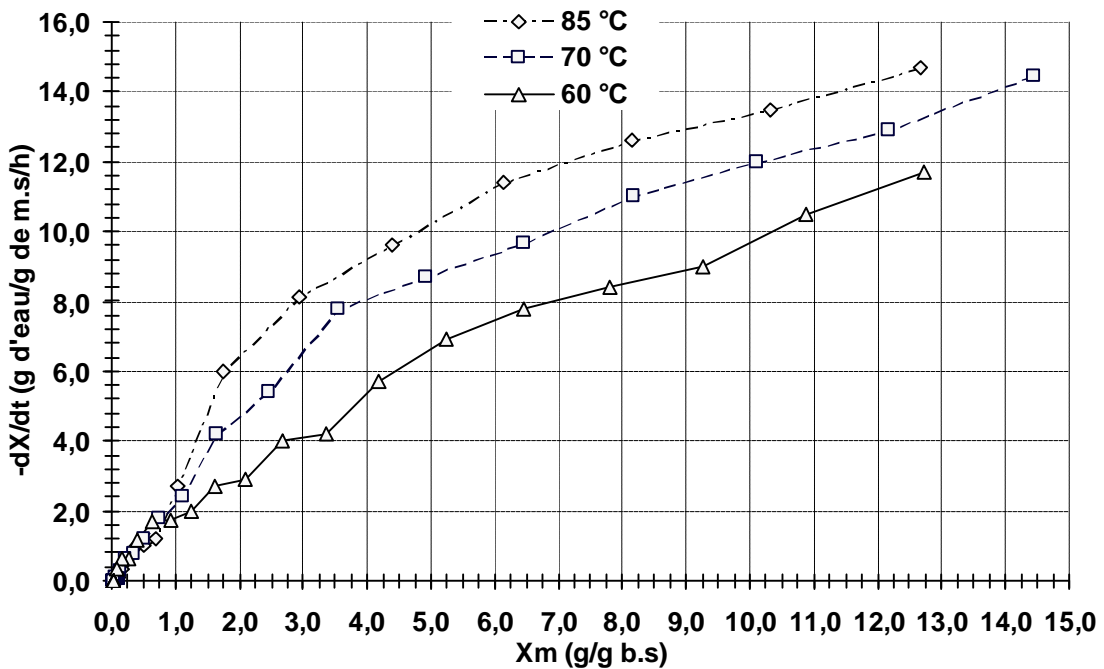
►► Au temps t_m initial de 5min (figure 19 b et 19 c), les vitesses initiales $(-dX/dt)_i$ des courbes de séchage des rondelles de courgette d'épaisseur $8,4 \pm 0,4$ mm à 60 ; 70 et 85 °C sont respectivement de 7,5 ; 10,0 et 10,2 g d'eau/g m.s/h où celle de 85°C est plus élevée que les deux autres et celle de 60 °C est la plus faible , correspondant aux teneurs en eau initiales X_{mi} de 13,08 , 14,83 et 12,85 g /g b.s soit 92,9 , 93,68 et 92,78 % b.h. L'effet de la température est faible en début de séchage jusqu'à 55 min (figure 19 b) avec les courbes de 70 et 85 °C dont les vitesses de séchage sont proches 6,27 et 6,6 g/g m.s/h. Ensuite entre 95 et 105 min les courbes de 60 et 70 °C se confondent, aux vitesses de 3,78 et 3,72 à 3,45 et 3,42 g/g m.s/h respectives. Au delà, les cinétiques évoluent séparément, La courbe de 85°C évolue séparée des deux autres courbes (figure 19 c) jusqu'aux vitesses de 2,46 et 2,7 g/g m.s/h où elle se confond à celle de 70 °C jusqu'à la fin du séchage.

► La courbe de séchage à 60 °C montre que les rondelles atteignent la teneur en eau suffisante X_{m1} de 0,093 g/g b.s (8,51 % b.h) à Δt_1 5h25min (325 min) de séchage qui est suffisant pour éliminer ΔX_{m1} de 12,98 g/g b.s soit 92,85 % b.h .La teneur en eau finale X_{mf} de 0,052 g/g b.s (4,94 % b.h) est atteinte avec un temps supplémentaire de 1h30 min (90 min) pour évaporer la quantité de 4,1 % b.s (3,94 % b.h).Le temps total pour évaporer ΔX_{mt} de 13,02 g/g b.s soit 92,87 % b.h, est de 6h 55min (415 min) au cours du séchage des rondelles de cette épaisseur.

► La courbe de séchage à 70 °C montre que la teneur en eau ciblée est atteinte au bout de Δt_1 4 h 15min(255 min) avec $X_{m1} = 0,089$ g/g b.s soit 8,17 % b.h pour évaporer ΔX_{m1} de 14,74 g/g b.s soit 93,65 % b.h. La teneur en eau finale $X_{mf} = 0,033$ g/g b.s (3,19% b.h) est atteinte avec 2h40 min (160 min) de plus de pour éliminer 5,6 % b.s (5,3 % b.h). La durée totale pour éliminer ΔX_{mt} de 14,80 g/g b.s (93,67% b.h) est Δt_t de 6h55min (415 min) au cours du séchage de ces rondelles.

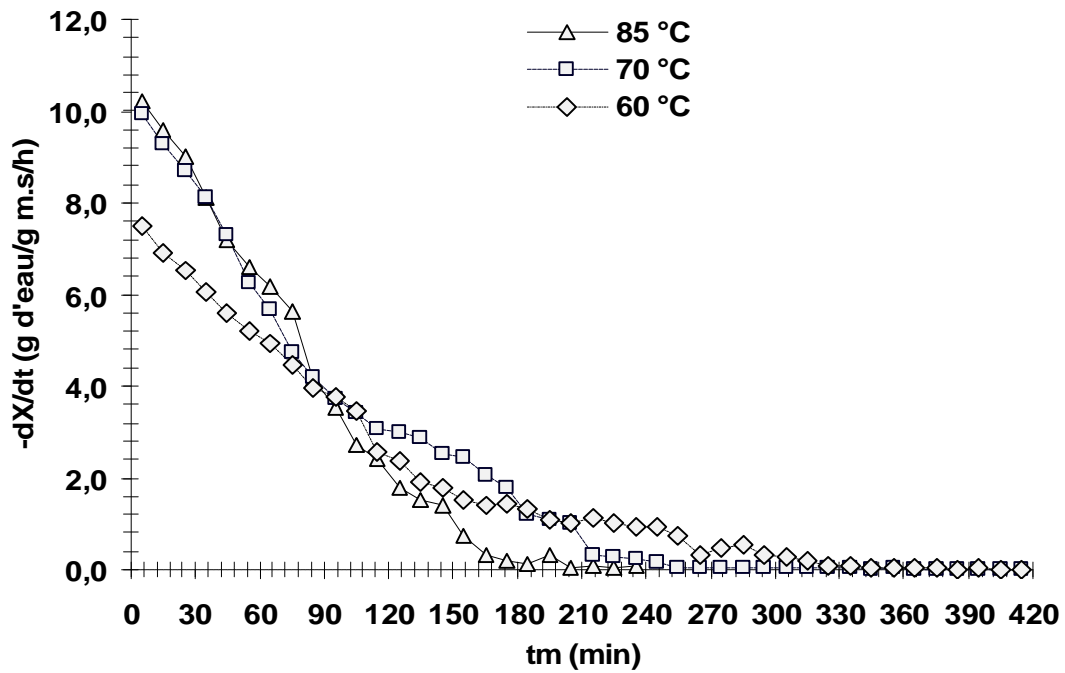


b : Vitesse de séchage de rondelles de courgette de 5,7 mm d'épaisseur ; $X_m=f(t_m)$

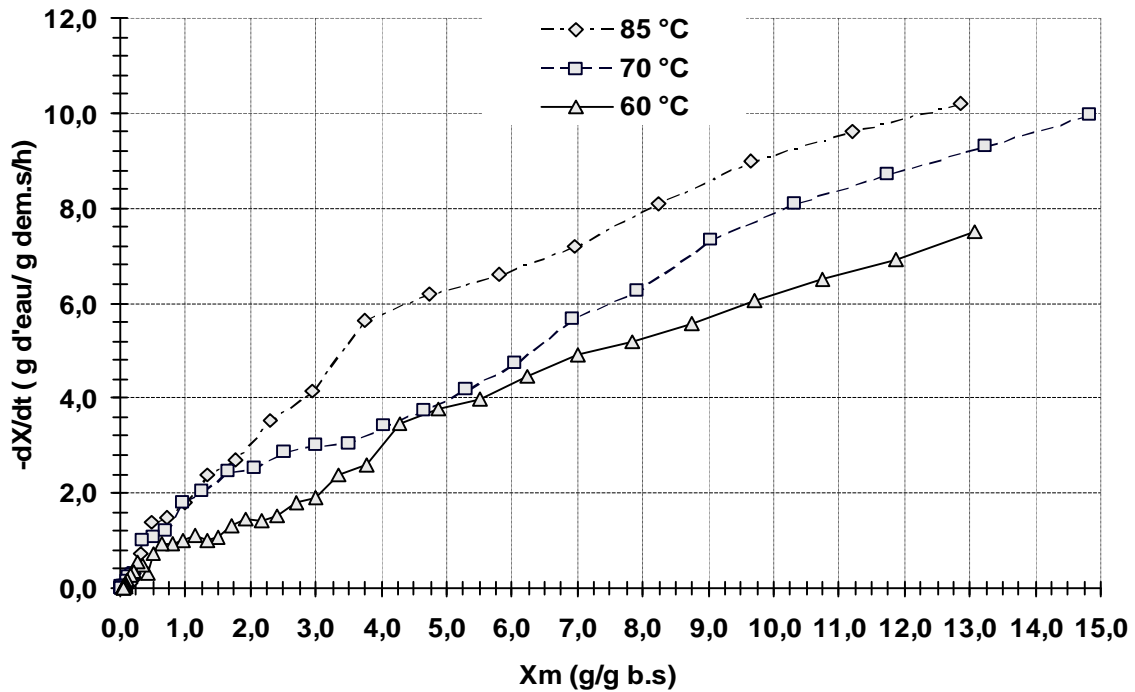


c : vitesse de séchage de rondelles de courgette de 5,7mm d'épaisseur; $-dX/dt=f(X_m)$

**Figure 18 : Effet de la température sur la vitesse de séchage de rondelles de courgette d'épaisseur 5,7 mm :
(b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$**



b : Vitesse de séchage de rondelles de courgette de 8,4 mm d'épaisseur ; $-dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de rondelles de courgette de 8,4mm d'épaisseur; $-dX/dt=f(X_m)$

**Figure 19 : Effet de la température sur la vitesse de séchage de rondelles de courgette d'épaisseur 8,4 mm :
(b) $-dX/dt = f(t_m)$ et(c) $-dX/dt = f(X_m)$**

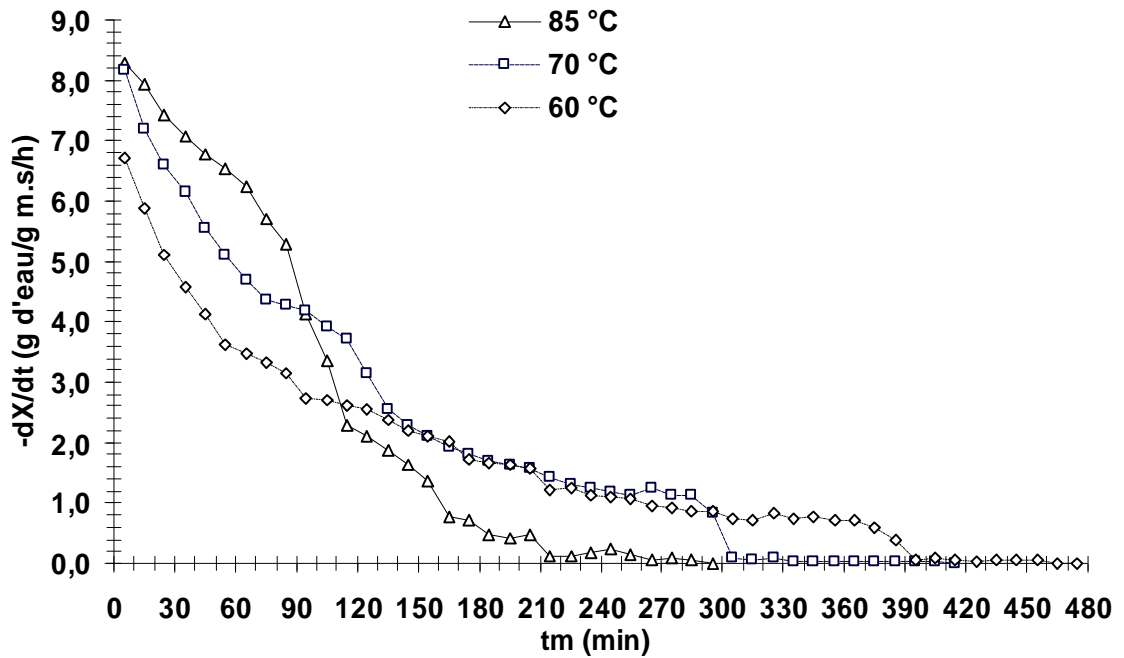
► La courbe de séchage à 85°C, montre que la teneur en eau ciblée est atteinte après Δt_1 de 3h 25 min (205 min) de séchage seulement avec $X_{m1}=0,098$ g/g b.s (8,93 % b.h) et l'évaporation de $\Delta X_{m1}=12,75$ g/g b.s soit 92,73 % sur base humide. La teneur en eau X_{mf} de 0,068 g/g b.s (6,37 % b.h) est atteinte avec une durée supplémentaire de 30min pour extraire 2,9 % sur b.s soit 2,82 % b.h. Le temps total Δt_t pour extraire ΔX_{mt} de 12,78 g/g b.s soit 92,74 % d'eau sur base humide est de 3h 55min (235min) au cours du séchage de ces rondelles de courgette de 8,4 mm d'épaisseur.

► Le changement de pente est observé à 105 ; 85 et 75 min pour les températures de 60 ; 70 et 85°C (figure 19 b), correspondant à des vitesses de 3,45 ; 4,20 et 5,64 g/g m.s/h et aux X_m respectives de 4,27 ; 5,30 et 3,75 g/g b.s (81,02 ; 84,13 et 78,95 % sur b.h) (figure 19 c) . Ces points correspondent à l'évaporation des ΔX_m de 8,81 ; 9,53 et 9,10 g/g b.s soit 89,8; 90,5 et 90,1 % sur base humide.

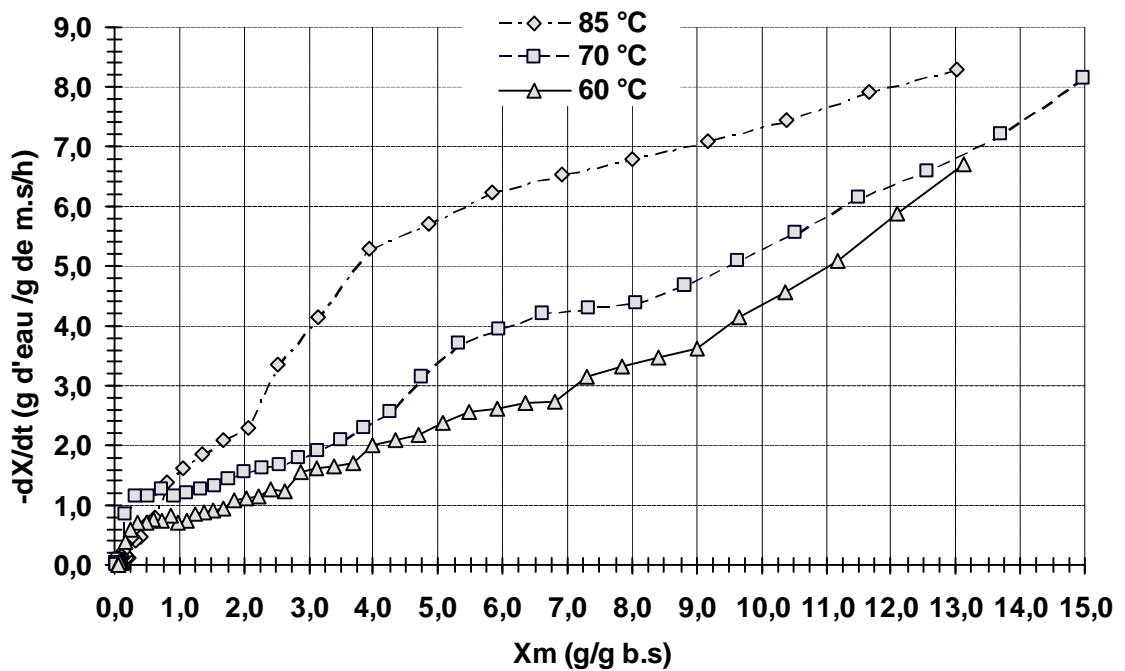
La vitesse de séchage montre une évaporation élevée au début avec $(-dX/dt)_i$ relativement élevée jusqu'au point d'inflexion avec changement de l'allure de la courbe et abaissement de la vitesse au fur et à mesure que la teneur en eau résiduelle diminue. La diminution de la quantité d'eau évaporée à partir du point d'inflexion, ainsi que la faible vitesse à partir de ce point d'inflexion, nécessite une durée plus longue pour éliminer de faibles quantités d'eau jusqu'à X_{mf} respective qui est de 5h 10min (310min); 5h30min (330min) et 2h40 min (160min). Ce temps correspond à 74,7 ; 79,5 et 68,1 % de la durée totale respective (60 ,70 et 85°C) du séchage.

► ► Au temps t_m initial de 5min (figure 20 b et 20 c), les vitesses initiales $(-dX/dt)_i$ des courbes de séchage des rondelles de courgette d'épaisseur $12,3\pm 0,4$ mm à 60 ; 70 et 85 °C sont respectivement de 6,72 ; 8,16 et 8,28 g d'eau/g m.s/h où celle de 85°C est plus élevée que les deux autres et celle de 60 °C étant la plus faible , correspondant aux teneurs en eau initiales X_{mi} de 13,14 , 14,98 et 13,01 g/g b.s soit 92,93 , 93,74 et 92,86 % b.h.

L'effet de la température est apparent dès le début de séchage (figure 20 b et 20 c), où les cinétiques de vitesse évoluent séparément, jusqu'aux vitesses de 1,26 et 1,38 g/g m.s/h où la courbe de 70°C se confond à celle de 85°C aux teneurs en eau respectives de 0,725 et 0,815 g/g b.s (42,03 et 44,9 % b.h) jusqu'à la fin du séchage.



b : Vitesse de séchage de rondelles de courgette de 12,3 mm d'épaisseur; $-dX/dt = f(t_m)$



c : vitesse de séchage de rondelles de courgette de 12,3 mm d'épaisseur; $-dX/dt = f(X_m)$

**Figure 20 : Effet de la température sur vitesse de séchage de rondelles de courgette d'épaisseur 12,3 mm :
(b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$**

► La courbe de séchage à 60°C montre que les rondelles atteignent la teneur en eau suffisante X_{m1} de 0,097 g/g b.s (8,84 % b.h) à Δt_1 7h 05min (425 min) de séchage qui est suffisant pour éliminer ΔX_{m1} de 13,04 g/g b.s soit 92,98 % b.h. La teneur en eau finale X_{mf} de 0,066 g/g b.s (6,19 % b.h) est atteinte avec un temps supplémentaire de 50 min pour évaporer la quantité de 3,1 % b.s (3,0 % b.h). Le temps total pour évaporer ΔX_{mt} de 13,07 g/g b.s soit 92,89 % b.h, est de 7h 55min (475 min) au cours du séchage des rondelles de cette épaisseur.

► La courbe de séchage à 70°C montre que la teneur en eau ciblée est atteinte au bout de Δt_1 5 h 05min (305 min) avec $X_{m1} = 0,092$ g/g b.s soit 8,42 % b.h pour évaporer ΔX_{m1} de 14,89 g/g b.s soit 93,71 % b.h. La teneur en eau finale $X_{mf} = 0,022$ g/g b.s (2,15 % b.h) est atteinte avec 1h 50 min (110 min) de plus pour éliminer 7,0 % b.s (6,54 % b.h). La durée totale pour éliminer ΔX_{mt} de 14,96 g/g b.s (93,73% b.h) est Δt_t de 6h55min (415 min) au cours du séchage de ces rondelles.

► La courbe de séchage à 85°C, montre que la teneur en eau ciblée est atteinte après Δt_1 de 4h 15 min (255 min) de séchage avec $X_{m1} = 0,099$ g/g b.s (9,0 % b.h) et l'évaporation de $\Delta X_{m1} = 12,91$ g/g b.s soit 92,81 % sur base humide. La teneur en eau X_{mf} de 0,053 g/g b.s (5,03 % b.h) est atteinte avec une durée supplémentaire de 40min pour extraire 4,6 % sur b.s soit 4,4 % b.h. Le temps total Δt_t pour extraire ΔX_{mt} de 12,96 g/g b.s soit 92,84 % d'eau sur base humide est de 4h 55min (295min) au cours du séchage de ces rondelles de courgette de 12,3 mm d'épaisseur.

► Le changement de pente est observé à 85 ; 75 et 65 min pour le température de 60 ; 70 et 85°C (figure 20 b), correspondant à des vitesses de 3,14 ; 4,38 et 6,24 g/g m.s/h et aux X_m respectives de 7,3 ; 8,06 et 5,84 g/g b.s (87,95 ; 88,96 et 85,38 % sur b.h) (figure 20 c). Ces points correspondent à l'évaporation des ΔX_m de 5,84 ; 6,93 et 7,17 g/g b.s soit 85,38; 87,39 et 87,76 % sur base humide.

La vitesse de séchage montre une évaporation élevée au début avec $(-dX/dt)_i$ relativement élevée jusqu'au point d'inflexion avec changement de l'allure de la courbe et abaissement de la vitesse au fur et à mesure que la teneur en eau résiduelle diminue. La diminution de la quantité d'eau évaporée à partir du point d'inflexion, ainsi que la faible vitesse à partir de ce point, nécessite une durée plus longue pour éliminer de faibles quantités d'eau jusqu'à X_{mf} respective qui est de 6h 30min (390min); 5h40min (340min) et 3h20 min (230min). Ce temps correspond à 82,1 ; 81,9 et 78,0 % de la durée totale respective (60 ,70 et 85°C) du séchage.

L'effet de la température sur la cinétique de séchage apparaît nettement sur les courbes des allures de vitesse de séchage, où l'évolution du séchage est rapide pour les rondelles séchées à 85 °C suivi par celles de 70 °C et enfin les plus lentes à atteindre les teneurs <0,1 sont celles de 60 °C.

On remarque sur les figures que les courbes de cinétique de 70 °C se croisent avec celles de 60 °C ($X_i=13.7\text{g/g b.s.}$), ceci est dû au fait que la teneur en eau initiale est plus élevée pour les courgettes utilisées lors du séchage à 70 °C (15,7 g/g b.s).

D'après ce qui précède, il ressort que la vitesse de séchage la plus élevée est obtenue par la température la plus élevée 85 °C, et la plus faible est assurée par la température la plus basse 60 °C. Ainsi l'effet de la température de l'air de séchage constitue un des paramètres importants qui influent sur l'allure de la cinétique et la vitesse de séchage des rondelles de courgette.

3-1-2-Effet de la dimension sur la cinétique et la vitesse de séchage

La description des allures de séchage des différentes courbes étant déjà faite au niveau du chapitre précédent nous nous limiterons dans ce cas à donner l'effet de la taille de découpe.

► L'allure des courbes de séchage de la courgette (figure 21a), montre qu'à 60 °C l'effet de la découpe est remarquable dès le début du séchage où les trois courbes démarrent avec des vitesses initiales nettement différentes (figure 21b et 21c). La vitesse de séchage ($-dX/dt$)_i la plus élevée est assurée par la petite épaisseur suivie par celle qui lui est supérieure et la plus faible vitesse est donnée par la plus épaisse des découpe respectivement de 11,7 ; 7,5 et 6,72 g/g m.s/h.

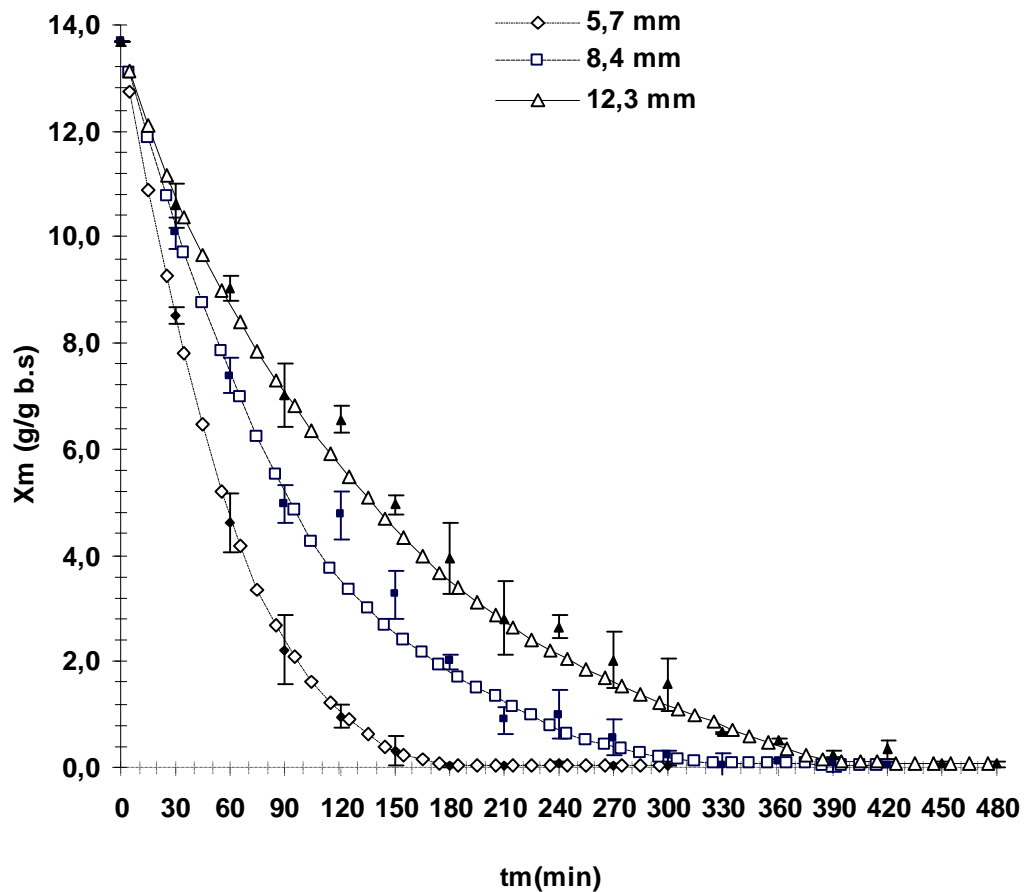
La durée de séchage suffisante pour atteindre la teneur en eau ciblée (< 10% b.s) est plus courte avec l'épaisseur de 5,7mm, que celle de 8,4mm et la plus longue est celle de 12,3 mm , avec des Δt_1 de 2h55min (175 min), 5h 25min (325 min) 7h05min (425min) correspondants aux ΔX_{m1} respectives de 12,66 ; 12,98 et 13,04 g/g b.s soit 92,68 ; 92,85 et 92,88 % sur base humide.

L'effet de l'épaisseur est significatif tout le long du séchage pour les trois épaisseurs jusqu'aux basses teneurs en eau où il s'atténue pour les courbes de 8,4 et 12,3 mm aux vitesses respectives de 0,945 et 0,765 g/g m.s/h correspondant aux X_m de 0,649 et 0,601 g/g b.s

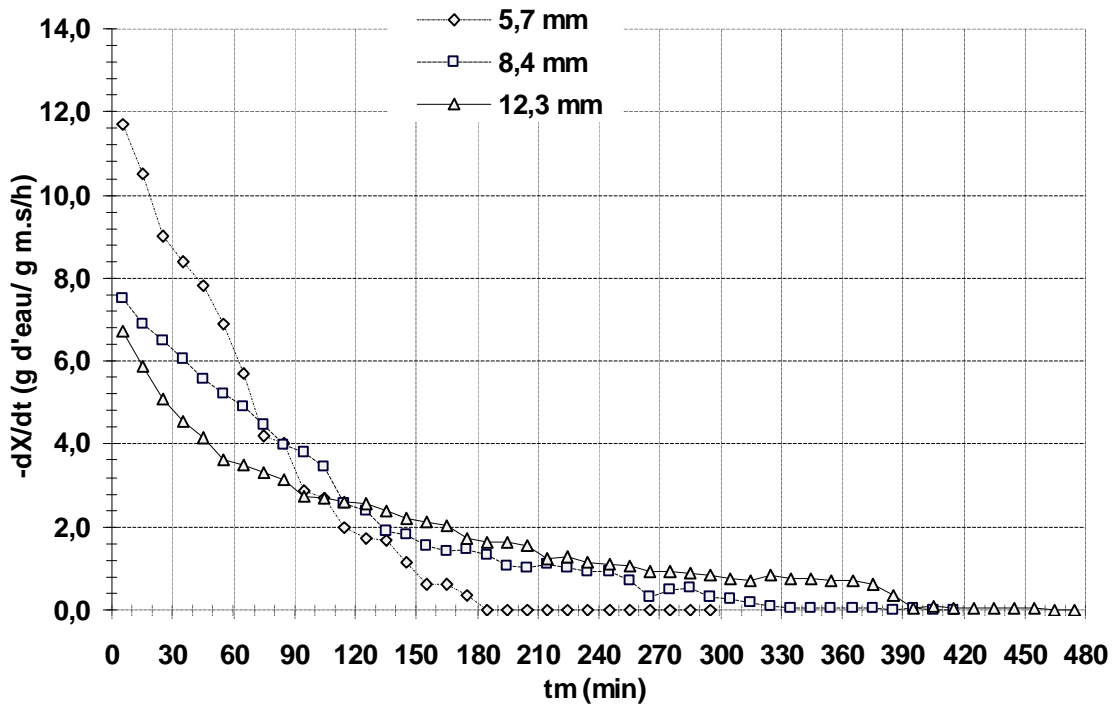
(39,36% et 37,54 % b.h) jusqu'à la fin du séchage. La courbe de 5,7 mm évolue séparément des deux courbes jusqu'à la teneur basse < 10% sur base sèche.

► L'allure des courbes de séchage de la courgette à 70°C (figure 22 b et 22 c), montre que l'effet de la découpe est important. Les courbes des trois épaisseurs démarrent avec des vitesses de séchage initiales $(-dX/dt)_i$ différentes où la plus élevée est assurée par l'épaisseur la plus petite 5,7 mm suivie par celles de 8,4 mm et enfin la plus faible est assurée par celle de 12,3 mm avec respectivement 14,46 ; 10,0 et 8,16 g/g m.s/h.

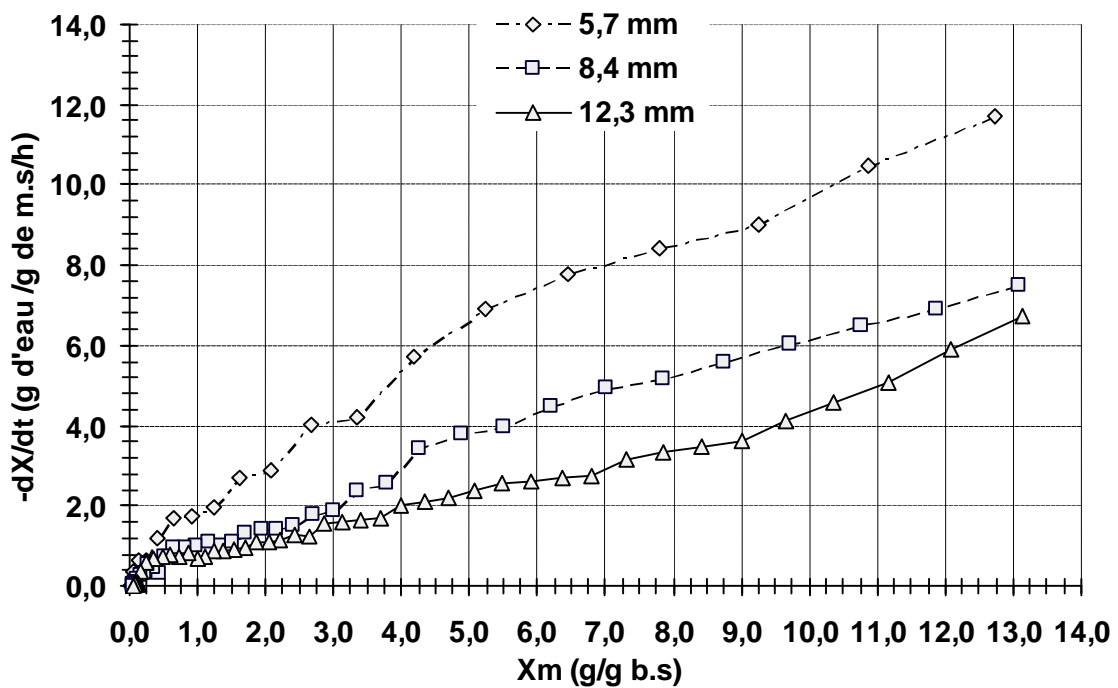
La durée de séchage suffisante pour atteindre la teneur en eau <10% b.s est plus courte avec l'épaisseur 5,7 mm suivie par celle de 8,4 et enfin la plus longue est celle assurée par 12,3mm étant plus épaisse avec respectivement 2h55min (175min), 4h15min(255min) et 5h 05min (305min). Ces temps correspondent aux ΔX_m de 14,36 ; 14,74 et 14,89 g/g b.s soit 93,49 ; 93,65 et 93,71 % sur base humide respectivement.



a : séchage de la courgette ,à 60 °C ; $X_m = f(t_m)$

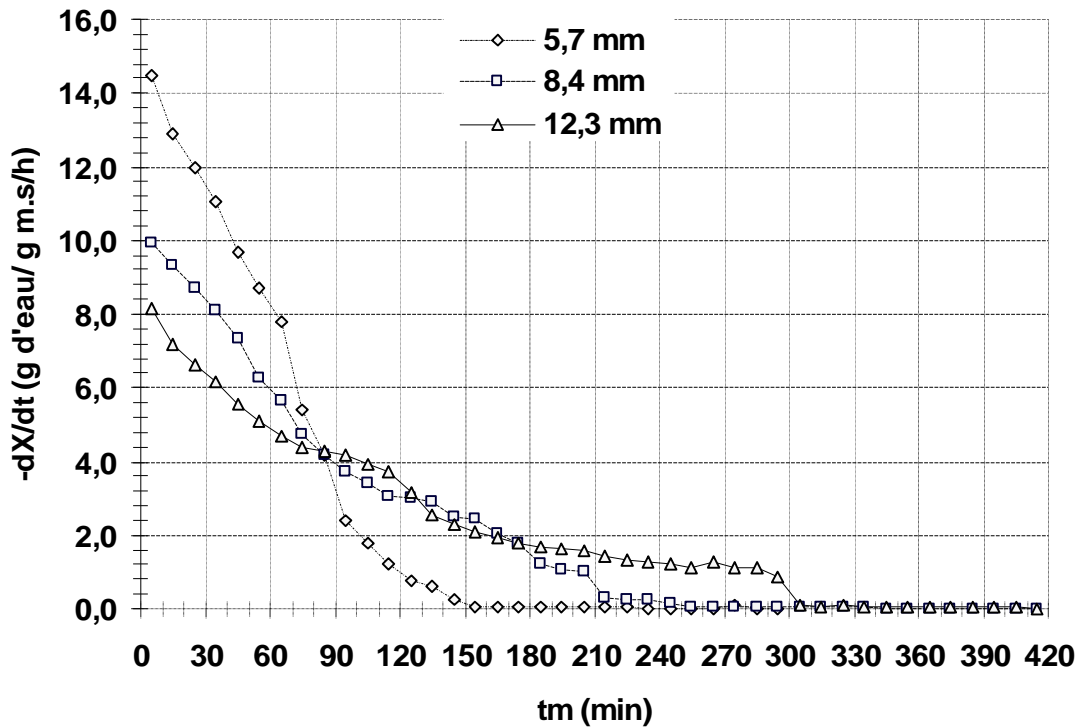


b : Vitesse de séchage à 60°C - $dX/dt = f(t_m)$

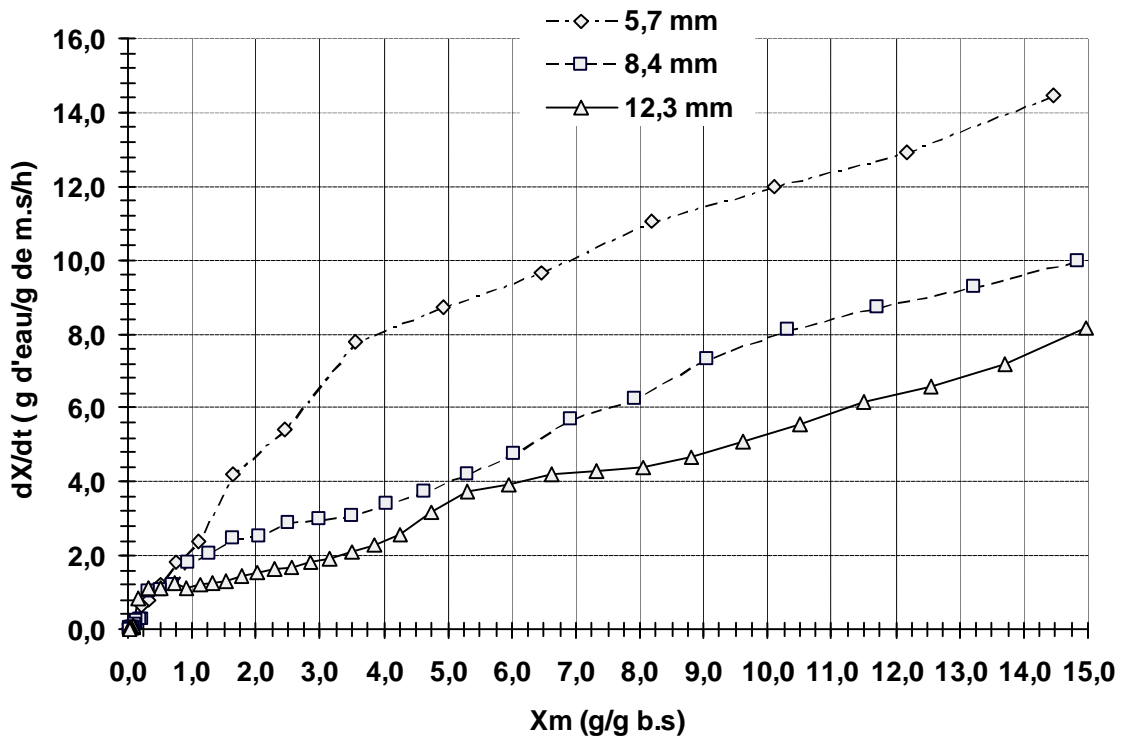


c : vitesse de séchage de la courgette à 60°C, $-dX/dt=f(X_m)$

Figure 21 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage de rondelles de courgette à 60 °C (épaisseur 5,7 ; 8,4 et 12,3 mm) : (a) $X_m = f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

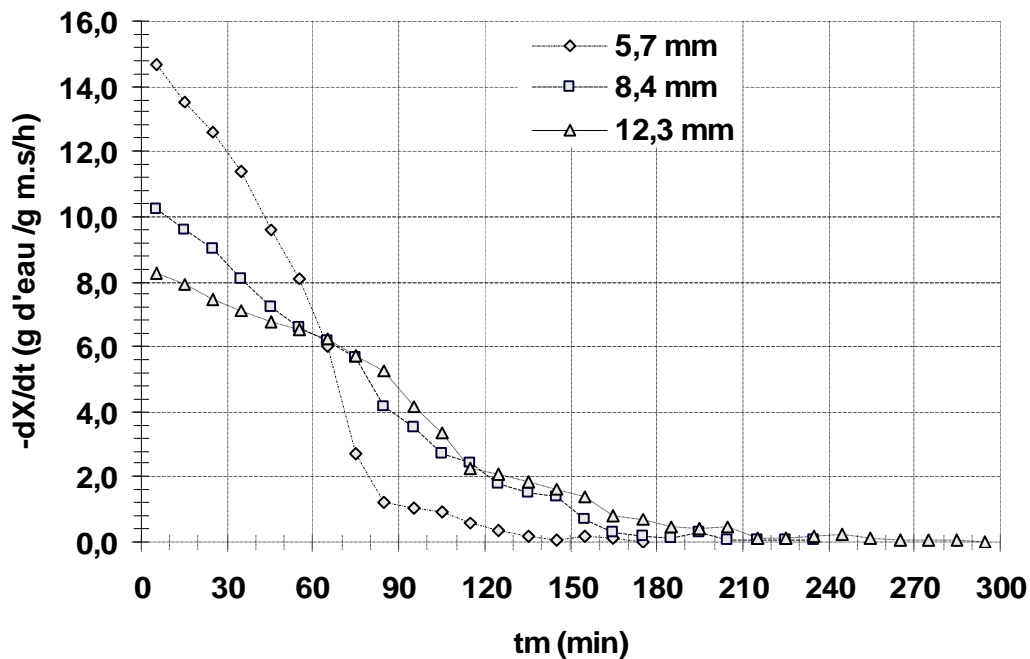


b : Vitesse de séchage de la courgette à 70°C $-dX/dt = f(t_m)$

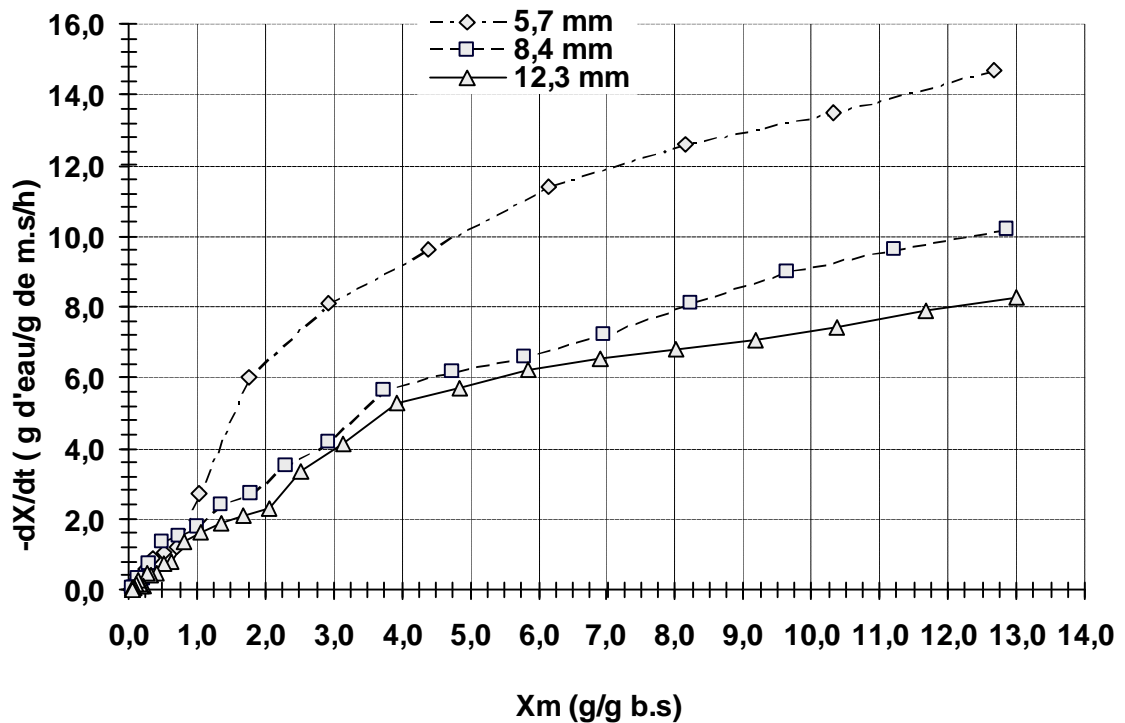


c : vitesse de séchage de la courgette à 70°C, $-dX/dt = f(X_m)$

Figure 22 : Effet de la taille de découpe sur la vitesse de séchage de rondelles de courgette à 70 °C (épaisseur 5,7 ; 8,4 et 12,3 mm) ;
(b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$



b : Vitesse de séchage à 85°C $-dX/dt = f(tm)$



c : vitesse de séchage de la courgette à 85°C, $-dX/dt=f(Xm)$

Figure 23 : Effet de la taille de découpe sur la vitesse de séchage de rondelles de courgette à 85 °C (épaisseur 5,7 ; 8,4 et 12,3 mm) ;
(b) $-dX/dt = f(tm)$ et (c) $-dX/dt = f(Xm)$

L'effet de l'épaisseur est important sur toute la durée du séchage des trois épaisseurs jusqu'aux basses teneurs en eau où les trois courbes se confondent aux vitesses respectives de 1,14; 1,26 et 1,2 g/g m.s/h correspondant à X_m de 0,525; 0,725 et 0,5 g/g b.s (34,43 ; 42,03 et 33,33 % b.h) jusqu'à la fin du séchage.

► L'allure des courbes de séchage de la courgette, montre qu'à 85 °C l'effet de la découpe est remarquable, dès le début du séchage les trois courbes démarrent avec des vitesses initiales nettement différentes (figure 23 b et 23 c). La vitesse de séchage $(-dX/dt)_i$ la plus élevée est assurée par l'épaisseur 5,7 mm, suivie par celle de 8,4 mm et la plus faible vitesse est affichée par la plus épaisse des découpe 12,3 mm de 14,7 ; 10,2 et 8,28 g/g m.s/h respectivement.

La durée de séchage suffisante pour atteindre la teneur en eau ciblée (< 10% b.s) est plus courte avec l'épaisseur de 5,7mm, que celle de 8,4mm et la plus longue est celle de 12,3 mm, avec des Δt_1 de 2h25min (145 min), 3h 25min (205 min) 4h15min (255min) correspondants aux ΔX_m respectives de 12,58 ; 12,75 et 12,91 g/g b.s soit 92,64 ; 92,73 et 92,81 % sur base humide.

L'effet de l'épaisseur est significatif tout le long du séchage pour les trois épaisseurs jusqu'aux basses teneurs en eau où il s'atténue aux vitesses respectives de 1,38; 1,38 et 1,5 g/g m.s/h correspondant aux X_m de 0,485 ; 0,725 et 0,815 et g/g b.s (32,66% ; 42,03 et 44,9 % b.h) jusqu'à la fin du séchage. Les courbes de 8,4 et 12,3 mm (figure 23 c) évoluent cote à cote à partir de 1h 05 min (65 min) et présentent le même comportement jusqu'à la fin du séchage.

3-1-3- Discussion et conclusion

A partir des courbes de cinétiques illustrées sur les figures 18 à 23, nous remarquons qu'au sein d'une température de l'air, la durée de séchage des rondelles varie d'une épaisseur à l'autre, la moins épaisse sèche plutôt que celle qui lui est supérieure et la plus épaisse sèche plus tard que les deux autres. Plus on augmente la température de séchage et plus la durée est moins longue.

L'ensemble des courbes des trois épaisseurs peut se diviser en deux périodes de vitesse décroissantes ;

-La première rapide allant jusqu'à une teneur en eau X_m comprise entre 2,93 et 8,06 g/g b.s en un temps compris entre 55 et 105 min correspondant à l'évaporation de 5,85 g/g b.s

(85,38% b.h) et 10,91 g/g b.s (91,6 % b.h) .Cette partie de l'eau évaporée en première sous phase est considérée comme une eau de liaison faible appartenant aux capillaires qui part en début de séchage.

La seconde sous phase à décroissance lente au delà de cette teneur jusqu'au séchage à des teneurs < 0,1 g/g b.s avec une élimination de 2,83 à 7,96 g/g b.s soit 73,89 à 88,84% sur base humide, correspondant à l'eau de plus en plus liée qui est difficile à éliminer et consomme beaucoup d'énergie. La durée de cette période est plus longue, elle représente entre 68,1 et 82,1 % de la totalité du temps de séchage.

L'effet de l'épaisseur sur les cinétiques de séchage est tout aussi important que celui de la température. Il est illustré dans les figures 21 ,22 et 23 des vitesses de séchage, où les courbes sont bien distinctes et séparées l'une de l'autre. Elles montrent l'influence du paramètre de la dimension et de la taille du produit à sécher, évidemment la plus fine des épaisseurs sèche plus rapidement que les deux autres et la plus large est celle qui met plus de temps pour atteindre les teneurs <0,1 g/g b.s. Ceci est valable pour les trois températures et les trois épaisseurs.

Cependant il est remarqué que les vitesses de séchage pour l'épaisseur de 5,7±0,2 mm aux trois températures, sont relativement élevées en début de séchage par rapport à celles de 8,4±0,4 mm et celles-ci sont supérieures à celles de 12,3±0,4 mm.

L'allure générale des courbes de vitesse à 60°C, montrent une évolution en cascades en 2^{ème} sous période, une sorte de séchage par à coups exprimant probablement la difficulté d'extraire l'eau à partir de la matrice du légume pour son évaporation.

3-1-4- Activité de l'eau (a_w) de la courgette séchée

La température ambiante mesurée au cours de la détermination de l' a_w de la courgette est de 26±1,3 °C. Le tableau 17 présente la masse moyenne des trois essais réalisés et les variations de masse obtenues à l'équilibre.

Tableau 17 : Moyenne de la masse initiale et de la variation de masse des 3 essais :

Concentration d'H ₂ SO ₄ % (v/v)	46	64	88	mi moyen (g)
HRE % à 25°C	43,82	10,89	0,082	
mi moyen (g)	1,03±0,01	1,03±0,01	1,03±0,02	1 ,03± 0,02

$\Delta m = (m_i - m_f / m_i) \%$	0,0508	0,0634	0,0755	
-----------------------------------	--------	--------	--------	--

L'activité de l'eau moyenne de trois essais obtenue pour la courgette sèche est de :

$a_w = 0,076 \pm 0,007$. L'équilibre est obtenu entre 69 et 167 heures pour les concentrations respectives croissantes d'acide sulfurique. L'équilibre est atteint plus longtemps pour les humidités relatives d'équilibre les plus basses correspondant aux concentrations les plus élevées.

L'activité de l'eau de la courgette séchée aux différentes températures serait aux environs de 0,0755 selon le point d'intersection sur l'axe des HRE (figure 24) et d'après les résultats donnés par le calcul de la courbe de tendance de la valeur de b. Cette valeur de l' a_w permet la conservation du produit séché pour une durée probable dépassant les six mois tout en inhibant tout développement de microorganismes.

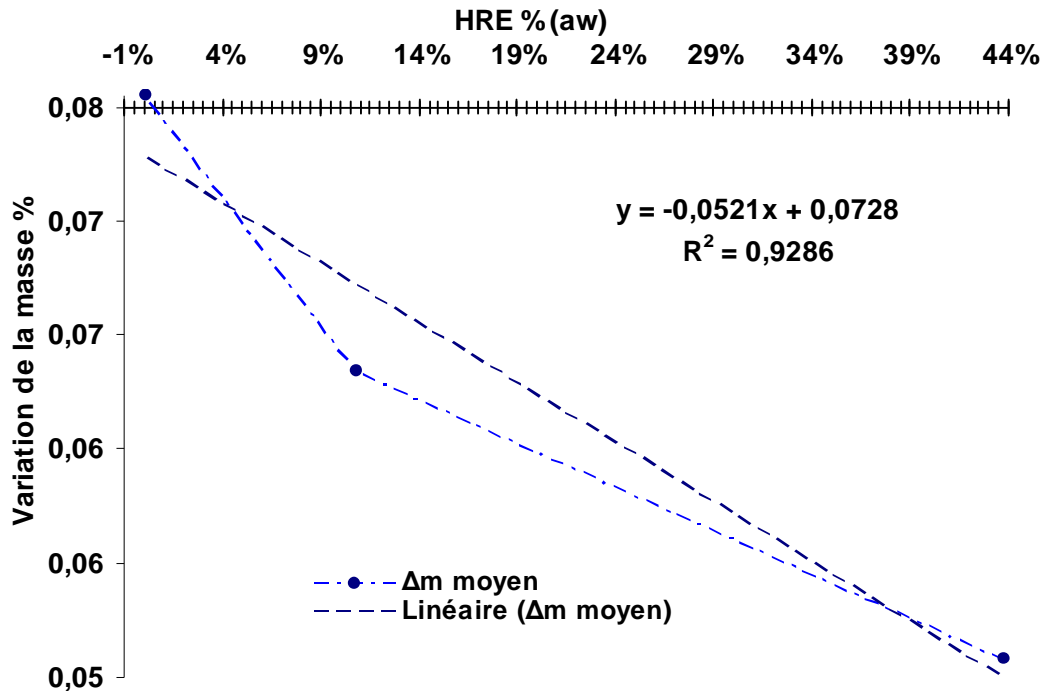


Figure 24 : Détermination de l'activité de l'eau (a_w) de la courgette sèche, avec des solutions de H_2SO_4 à HRE variées

3-2-Evolution de la qualité du légume au cours du séchage

3-2-1-Rétrécissement et déformation

L'allure du rétrécissement des rondelles aux trois températures et trois épaisseurs de découpe en fonction du temps et de la teneur en eau X est montrée par les figures 25, 26 et 27.

Les observations notées au cours des essais de séchage pour chacune des températures et épaisseurs de découpe montrent que la courgette se comporte de la même manière que les

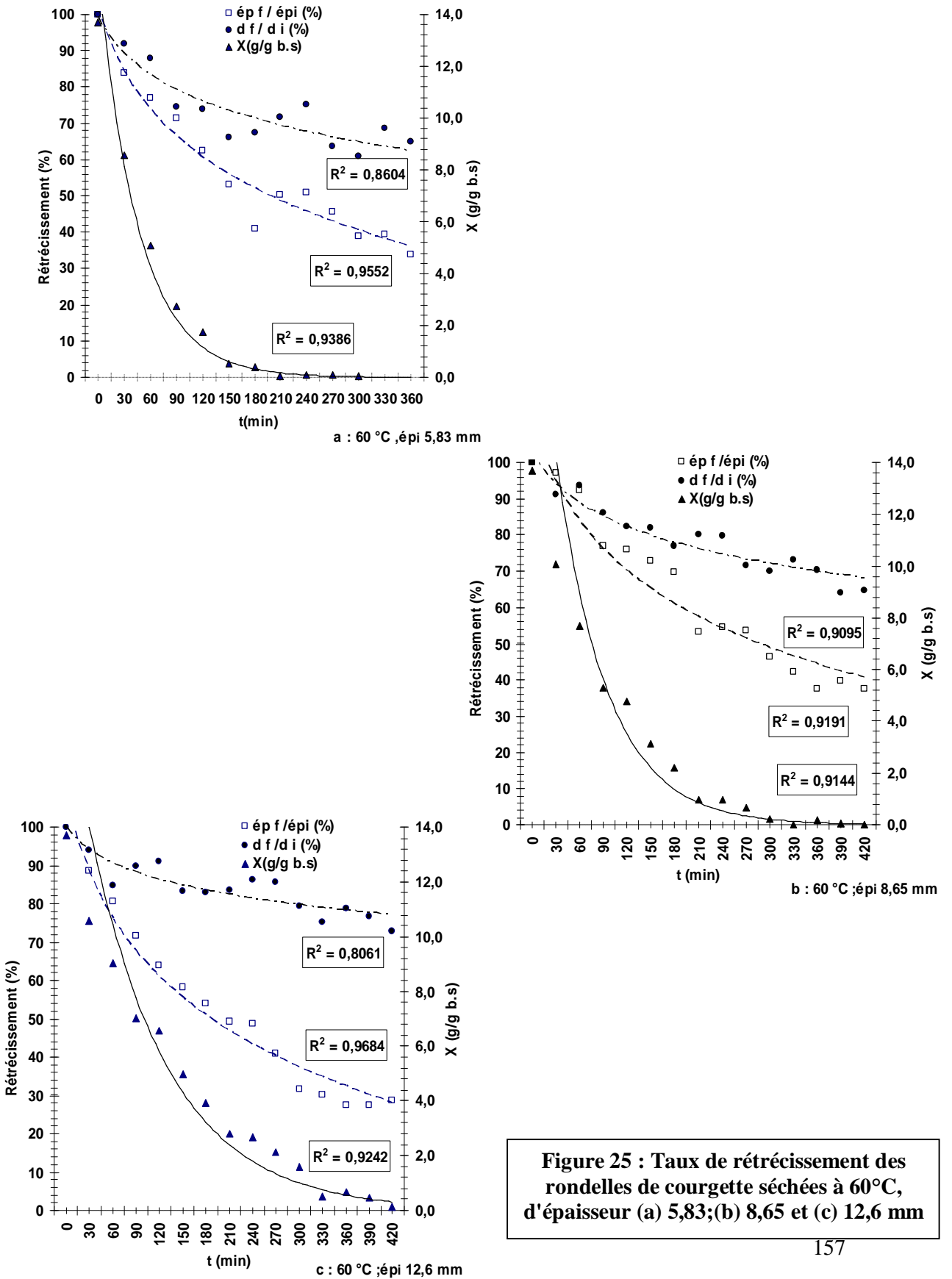


Figure 25 : Taux de rétrécissement des rondelles de courgette séchées à 60°C, d'épaisseur (a) 5,83;(b) 8,65 et (c) 12,6 mm

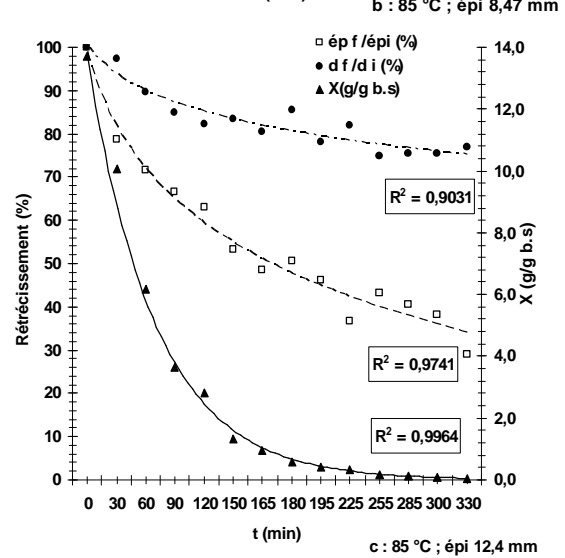
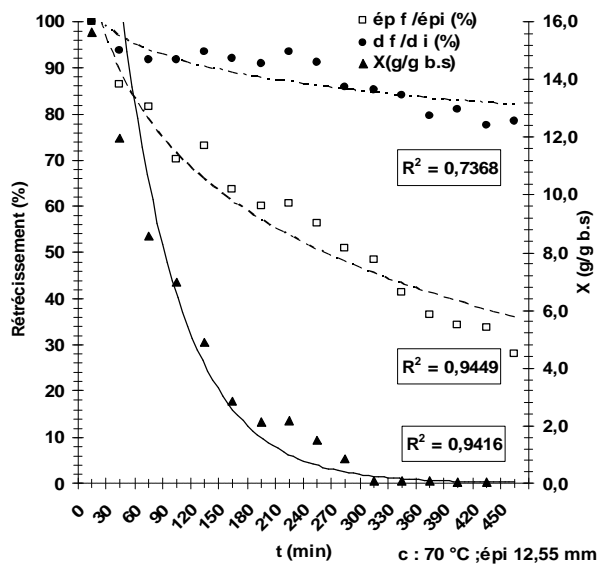
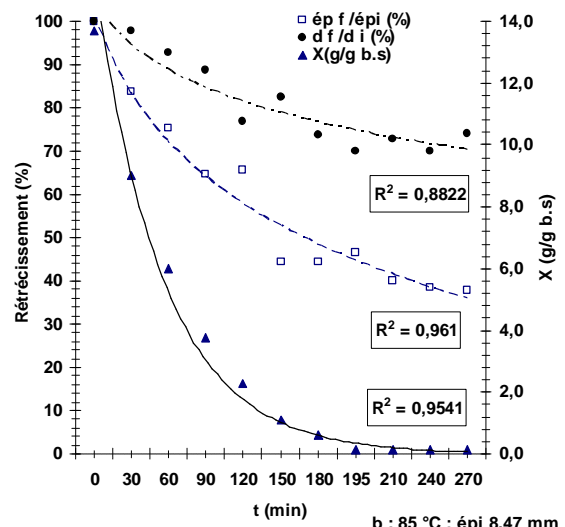
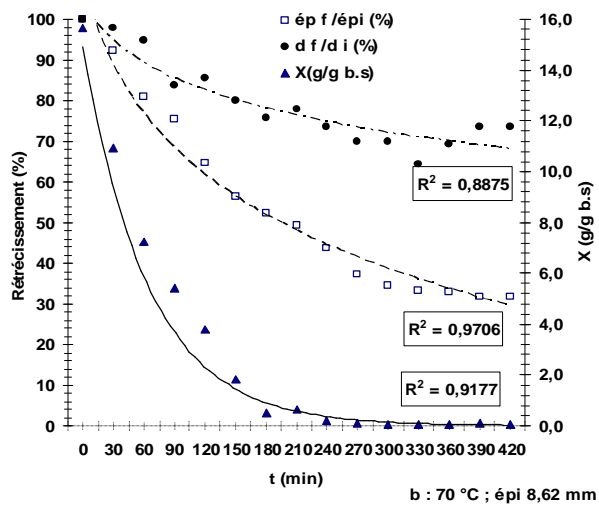
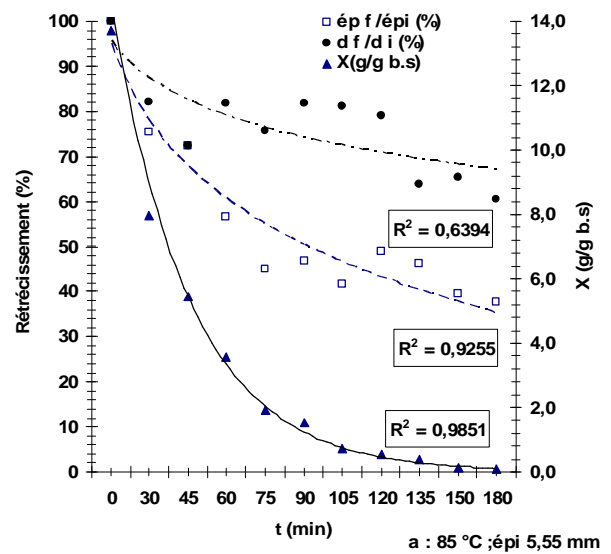
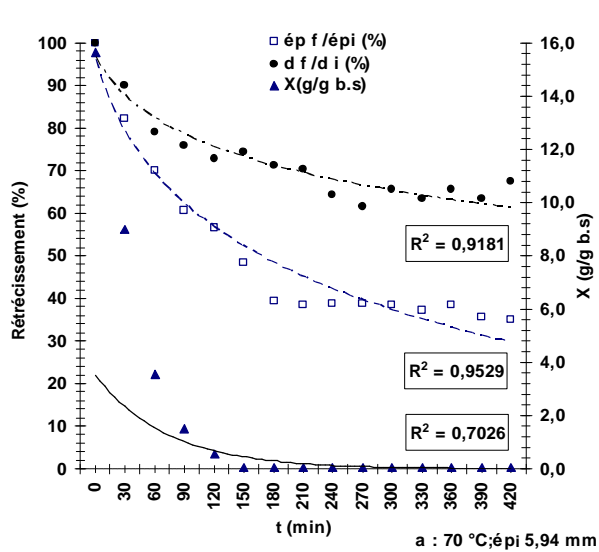


Figure 26 : Rétrécissement des rondelles de courgettes séchées à 70 °C d'épi 5,7 mm(a),8,4mm (b) et 12,3mm(c),f(t)et f(X)

Figure 27 : Rétrécissement des rondelles de courgettes séchées à 85 °C d'épi 5,7 mm(a),8,4mm (b) et 12,3mm(c),f(t)et f(X)

autres produits végétaux. Le rétrécissement s'accompagne de brunissement et durcissement en surface, du probablement au dessèchement des substances dissoutes laissées en surface des rondelles au cours du départ de l'eau.

Les tableaux 18 a et b présentés ci-dessous résument le rétrécissement de la courgette par les valeurs des dimensions initiales et finales des rondelles après séchage.

▪ Le taux de rétraction axiale de la petite épaisseur est plus important à 60 °C, il est de 66,3 % par rapport à celui des deux autres températures de 70 et 85 °C qui sont de 64,6 % et 61,9 %. L'effet de la température sur la rétraction des rondelles de petite épaisseur est en rapport à ce qui est rapporté par la littérature, à savoir que les échantillons qui séchant rapidement se rétractent le moins possible.

Pour ce qui est du diamètre, le comportement est différent de celui de l'épaisseur, la rétraction la plus faible est observée à 70 °C, de 26,4 % seulement ; alors que pour les

Tableau 18 a : Rétrécissement axial (épaisseur) des rondelles de courgette séchées

T° (°C)	t*(min)	Xi b.s/ xi b.h%	Xf b.s	xf b.h%	ép.i (mm)	ép.f (mm)	ép. f/épi%	Taux de rétraction
60°C	360	13,7/93,2	0,031±0,01	3,00	5,83±0,24	1,97±0,05	33,7	66,3±0,6
	390		0,048±0,02	4,58	8,65±0,11	3,20±0,51	37,0	63,0±6,4
	420		0,119±0,01	10,63	12,6±0,24	3,58±0,34	28,4	71,6±3,3
70°C	420	15,66/94,0	0,038±0,03	3,66	5,94±0,05	2,10±0,2	35,4	64,6±2,9
	420		0,069±0,03	6,45	8,62±0,1	2,73±0,19	31,7	68,3±1,8
	450		0,035±0,04	3,38	12,55±0,11	3,53±0,17	28,2	71,8±1,2
85°C	180	13,7/93,2	0,103±0,07	9,34	5,55±0,09	2,10±0,2	38,1	61,9±4,3
	270		0,115±0,05	10,31	8,47±0,20	3,21±0,15	37,9	62,1±1,6
	330		0,052±0,03	4,94	12,40±0,37	3,60±0,1	28,5	71,5±0,9

Tableau 18 b : Rétrécissement diamétral (diamètre) des rondelles de courgette séchées

T° (°C)	t*(min)	ép.i (mm)	di (cm)	df (cm)	Df/Di%	Taux de rétraction
60°C	360	5,83±0,24	3,22±0,08	1,96±0,14	65,0	35,0±3,5
	390	8,65±0,11	3,46±0,19	2,21±0,06	64,5	35,5±3,4
	420	12,6±0,24	4,15±0,33	3,02±0,3	72,7	27,3±1,8
70°C	420	5,94±0,05	3,46±0,11	2,34±0,06	73,6	26,4±5,9
	420	8,62±0,1	3,92±0,43	2,89±0,22	64,3	26,4±5,9
	450	12,55±0,11	4,12±0,36	3,23±0,37	78,4	21,6±2,8
85°C	180	5,55±0,09	4,11±1,05	2,49±0,03	60,6	39,4±3,6
	270	8,47±0,20	4,17±0,05	3,07±0,15	73,7	26,3±3,9
	330	12,40±0,37	3,97±0,2	3,05±0,04	76,8	23,2±4,4

*temps total de la conduite du séchage ; les rondelles peuvent atteindre des teneurs en eau basses avant cette durée ($X \leq 0,1$ g/g b.s.);

températures de 60 et 85 °C, elle est de 35,0 % et 39,4 % respectivement. Ceci est probablement dû au diamètre initial à 85°C qui est plus grand par rapport aux deux autres. On constate que la rétraction des rondelles coupées à $5,7 \pm 0,2$ mm d'épaisseur évolue dans le sens axial et diamétral en même temps, mais plus dans le sens de l'axe (épaisseur) que celui du diamètre.

Ce comportement suit la même évolution que celle de la cinétique de séchage ; plus les rondelles perdent de l'eau et plus elles rétrécissent, ceci est montré sur les courbes des figures 25 a, 26 a et 27 a et illustré par les photos de la figure 28 pour la température de 85°C.

- Pour l'épaisseur de 8,7 mm, le taux de rétraction le plus bas est noté à 85 et 60°C avec 62,1 et 63,0 %. Le plus élevé étant assuré par la température de 70°C de 68,3 %.

La rétraction du diamètre de ces rondelles, ne suit pas celle de l'épaisseur où il est noté que la plus élevée est assurée par 60 °C, au taux de 35,5 %, quand à celles séchées à 70 et 85 °C, il est moins élevé avec 26,4 % et 26,3, % respectivement.

Il est probable, que les rondelles séchées à 70 °C ayant une teneur en eau initiale élevée par conséquent une évaporation d'une quantité plus importante d'eau ayant donné ce taux de rétraction axial élevé.

Alors qu'à 60 et 85 °C, les teneurs en eau initiales étant plus basses et égales ont permis d'obtenir des valeurs proches. Le facteur limitant pour la première est la durée de séjour (390 min) et pour la seconde, l'effet de la chaleur provoquant le durcissement, la diminution à une teneur en eau basse (< 10% b.s) n'étant pas atteinte et par conséquent un effet sur la rétraction malgré une durée de séjour plus courte (270 min).

Le rétrécissement se fait dans les deux sens (épaisseur et diamètre), suivant l'allure de la cinétique de séchage, mais de façon plus importante en épaisseur qu'en diamètre, ce qui apparaît sur les courbes des figures 25 b ,26 b et 27 b.

- Enfin, les taux de rétraction axiale les plus élevés sont dans l'épaisseur de 12,9 mm avec les trois températures (60; 70 et 85 °C), avec des pourcentages conséquents, de 71,6 ; 71,8 et 71,5 % respectivement.

Les plus faibles taux de rétraction diamétrale sont assurés par cette épaisseur (12,3 mm) avec respectivement 27,3 ; 21,6 et 23,2 % (60 ; 70 et 85 °C).

Ce dernier cas peut s'expliquer par le fait, que l'effet de la température de séchage sur le légume par la formation de croûte suite à l'assèchement des solutés avec un durcissement en surface et le pourtour (au niveau de la pelure) des rondelles limite le départ de l'eau. La

formation du brunissement non enzymatique sur la surface exposée à l'air sec et chaud constituant un frein avec pour conséquence une durée de séchage plus importante (420; 450 et 330).

Cependant, l'évolution de la diminution de la taille suit celle de la cinétique de séchage comme montré sur les figures 25c ; 26 c et 27 c.

Ces rondelles étant plus épaisses avec un poids plus important (plus d'eau à éliminer), la rétraction axiale est presque la même pour les trois températures de 60 ; 70 et 85 °C, où l'effet de la température n'est pas apparent sur la rétraction de ces rondelles.

Le comportement des rondelles de courgette coupées aux trois épaisseurs, séchées à une même température montre que l'effet de la taille de découpe sur la rétraction axiale est apparent aux températures de 70 et 85 °C où les plus épaisses se rétractent plus que les moins épaisses, mais à 60°C mais il est inversé pour l'épaisseur de 5,7 et 8,4 mm où le taux de rétraction de la première est plus élevée que celui de la seconde et la plus épaisse montre un taux de rétraction plus élevé que les deux autres.

Quand au taux de rétraction diamétrale, l'effet de la taille de découpe est inversé où les taux les plus élevés sont donnés par les moins épaisses des découpes et les faibles taux sont assurés par la plus épaisse des découpes respectivement pour 60 et 70 et 85 °C.

3-2-2-Changement de couleur et de forme au cours du séchage

Au cours du séchage de la courgette, la majorité des rondelles mises à sécher ont présenté une déformation lors du rétrécissement en se courbant, et surtout le pourtour de la rondelle au niveau de la pelure; ce qui est du à l'effet de la température de séchage et le départ de l'eau en s'évaporant crée du vide dans les pores du produit. Cet aspect est observé sur les rondelles ayant un diamètre plus élevé que la moyenne des autres, avec une grande surface d'exposition à l'air de séchage aux températures de 70 et 85 °C. Celles qui ont les épaisseurs de 8,4 mm et 12,3 mm subissent plus de déformation avec un changement de couleur au brun; du au brunissement non enzymatique qui se manifeste sous l'influence de la durée d'exposition et de séjour.

Le choix de présenter les prises de vues montrant l'évolution du séchage de la courgette à 85 °C pour cause de changements plus importants qu'à 70 et 60 °C .

Les photos prises du suivi de la cinétique montrent l'aspect des rondelles avant séchage et leur changement de forme et de couleur au cours du séchage, présentées dans la figure 28.

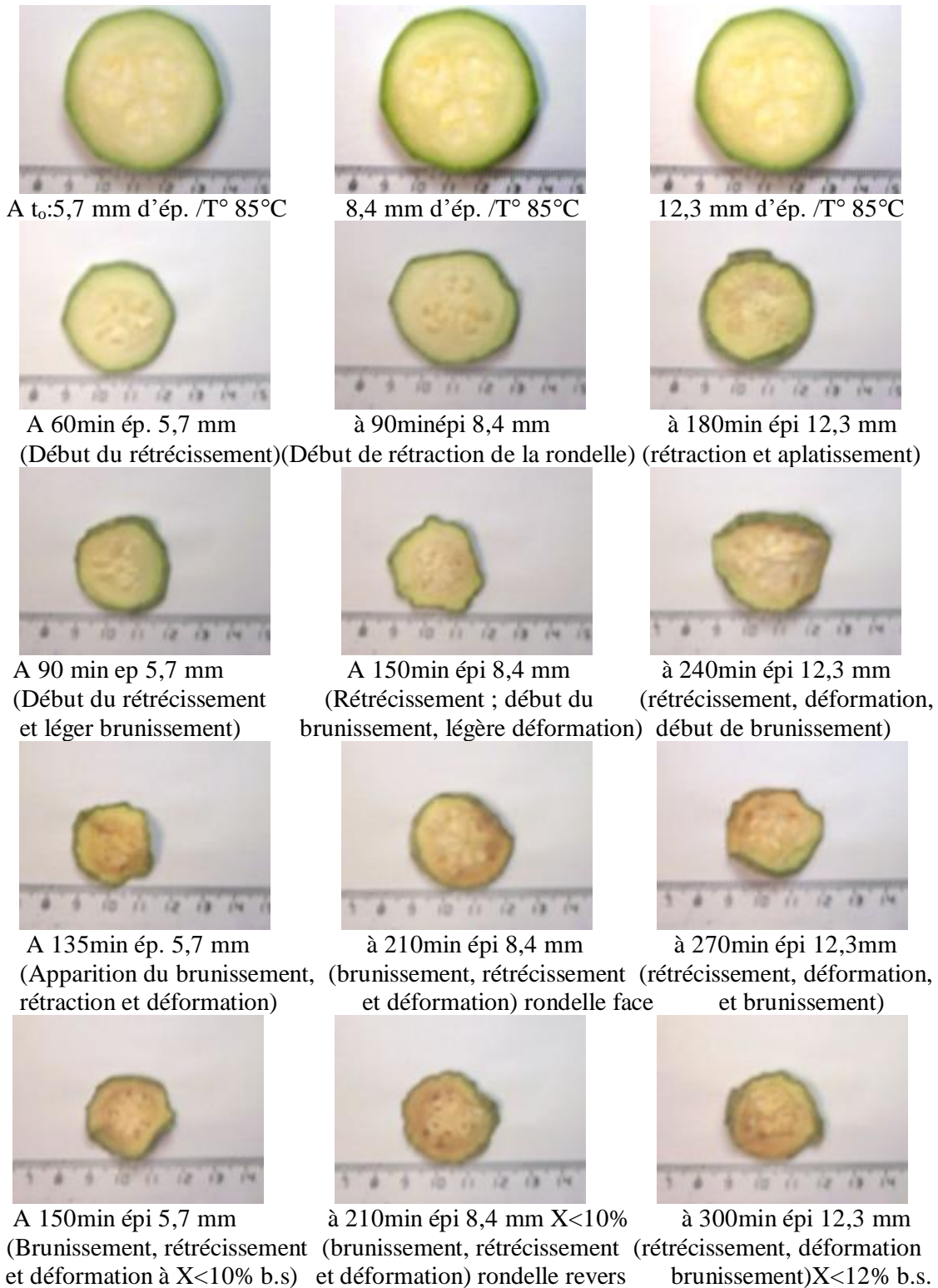


Figure 28 : Photos du suivi des changements de couleur et de forme des rondelles de courgette séchées à 85°C (épi 5,7 ; 8,4 et 12,3mm)

- Le séchage de la courgette à 60 °C des rondelles de 5,7 mm d'épaisseur montre un début de contraction à partir de 90 min avec une légère déformation et celui de 8,4 mm montre un léger rétrécissement, contrairement à celui de 12,3 mm où il est observé un début de rétraction de façon superficielle des rondelles à partir de 120 min (2 h).

Pour les deux dernières épaisseurs il est observé à 150 min, une rétraction nette des rondelles suivie par un aplatissement à 240 min (4 h). À 330 min (5h 30min), l'aplatissement, la rétraction avec déformation apparaissent nettement sur les rondelles. Les teneurs en eau atteintes pour les trois épaisseurs sont à 180 min (0,038 g/g b.s); à 330 min (0,022 g/g b.s) à 450 min (0,086 g/g b.s).

On observe un léger brunissement à 210 min pour l'épaisseur de 5,7 mm à 60 °C et de même pour l'épaisseur de 8,4 mm, allant de plus en plus intense jusqu'à 300 min ou il devient assez brun, par contre celle de 12,3 mm a légèrement bruni au cours du séchage.

- Le séchage de la courgette à 70°C, montre qu'à 60 min une légère rétraction des rondelles d'épaisseur 5,7 mm, est observée puis à 90 min elles commencent à se déformer et celles de 8,4 mm commencent à rétrécir . À 120 min légère rétraction en surface (rétrécissent) avec déformation, pour la petite épaisseur et celle de 8,4 et 12,3mm rétrécissent en surface. À 150 min en plus de la déformation, les rondelles de 5,7 mm s'aplatissent et leur épaisseur a diminué de 50% avec rétrécissement apparent et celle de 8,4 le rétrécissement est accompagné de déformation. Pour l'épaisseur 12,3mm les rondelles rétrécissent.

Le séchage est atteint pour l'épaisseur 5,7 mm à partir de 150' avec une teneur en eau (0.069g/g b.s) et à 180 min elle est de 0,056 g/g b.s pour qui les changements sont très prononcés et les deux autres épaisseurs subissent à ce moment la déformation et l'aplatissement.

La rétraction et déformation des rondelles avec aplatissement continuent d'évoluer jusqu'à 210 min de séchage où un léger brunissement est observé sur les rondelles. À partir de ce temps de 210 jusqu'à 390 min les teneurs en eau sont de 0,043 ; 0,047 g/g b.s et à 420 min 0,038 g/g b.s.

pour les rondelles de 8,4 mm d'épaisseur. à 180min (3h) la rétraction et déformation sont suivi d'un aplatissement et un léger brunissement est observé pour l'épaisseur de 12,3 mm . À 210' un léger brunissement est observé pour 8,4 mm .la teneur en eau <0.2 g/g b.s est atteinte à 240 min (4h) avec 0,199g/g b.s où le brunissement s'accroît pour 12,3 mm, à 270 min avec 0,109g/g b.s et à 300 min il devient assez brun à la teneur en eau résiduelle de 0,044 g/g b.s et 0,099g/g b.s respectivement pour 8,4 et 12,3mm.

A 300 min Les lots de 5.7 et 8.4 mm ont subit le plus de brunissement par contre l'ép. 12,3 mm a moins bruni au cours du séchage à 70°C..

et à 360' le brunissement apparaît nettement sur les rondelles avec le rétrécissement et le déformation. ;

De 390 min(6h30 min) à 420 min (7h) il y'a brunissement pour les rondelles de 8,4 et 12,3 mm d'épaisseur accompagné d'un durcissement en surface probablement du à la diffusion de matières solubles qui ont provoqué la formation d'une croûte en surface aux teneurs en eau respectives de 0,085 ;(0,057) et 0,069 ;(0,023). g/g b.s.

- Le suivi du séchage de la courgette à 85 °C, des trois épaisseurs, est illustré par des photos (figure 28). On observe pour l'épaisseur 12,3 mm, un léger rétrécissement qui s'accroît à partir de 120 min avec déformation des rondelles. À 210min il y'a abaissement de la teneur en eau résiduelles et à 240min, observation de la déformation des rondelles et brunissement de la face exposée au flux d'air chaud avec des teneurs en eau X de 0.137 ; 0.068 ; 0.071 et 0.0093 g/g b.s, et enfin à 270min, X est de 0,05 et 0,054 g/g b.s.

Pour l'épaisseur 8,4 mm, le rétrécissement apparaît à partir de la 90^{ème} min avec déformation et à partir de 120min et au delà, le brunissement commence et il est observé à 150min où le légume atteint les teneurs en eau de < 0.1 (0,09 g/g b.s).

Le rétrécissement commence à partir de la 60^{ème} min de séchage pour l'épaisseur 5,7 mm ,le légume commence à sécher et atteindre la teneur de 0,023g/g b.s à 90 min (1h 30min). Au delà on voit à 135 min (2h15min) un brunissement en surface des rondelles surtout la face exposée au flux d'air de séchage chaud. À 150 min le brunissement est apparent avec rétrécissement et déformation des rondelles à des teneurs en eau < 0,1 g/g b.s.

En plus des effets du départ de l'eau à partir de la matrice du végétal par la création d'une certaine porosité et le vide laissé par le transfert de l'eau sous forme liquide en début de séchage et où le rétrécissement est proportionnel au volume d'eau évaporé, BIMBENET et coll. (2002b) rapportent que les rétractions s'accompagnent en général, pour les produits biologiques, d'un écrasement de cellules qui crée un durcissement de la surface du matériau. Ce phénomène étant renforcé par la concentration des sucres et autres solutés entraînés par la diffusion de l'eau liquide. C'est ce que nous avons observés au cours du séchage des rondelles de courgette où il y'a apparition d'une sorte d'affaissement des rondelles qui s'aplatissent probablement du à ce phénomène d'écrasement des cellules.

GENIN & RENE (1996), dans leur étude sur la courgette, découpée en disques (rondelles) de 6 mm d'épaisseur ; congelés séchés (lyophilisés) à la $T_p=60^{\circ}\text{C}$ jusqu'au contenu en eau résiduelle finale de 1% dans le but de comparer les résultats avec ceux du procédé industriel. Les produits séchés ont été évalués par analyses sensorielles. L'apparence du produit (brûlé ou non) et la texture après réhydratation (caoutchouteuse ou non).

Ils rapportent que, la luminance de peau du végétal frais peut être liée à la durée de séchage. La qualité finale des courgettes séchées (défini par les critères de l'apparence du produit et sa texture après réhydratation) est rapportée en générale au degré de maturité de la matière première.

La teneur en hydrates de carbones est variable selon la variété, la saison et conditions de culture, elle est de 2 à 2,9 g/ 100g, celle des fibres est de 1,08 à 1,4 g/100g selon SOUCI et coll. (1994) ; FAVIER et coll. (1995) et ERARD (2002). Cette dernière augmente au cours de la maturité (protopectines et pectines à l'état jeune et, cellulose et hémicellulose au stade plus avancé (ERARD, 2002).

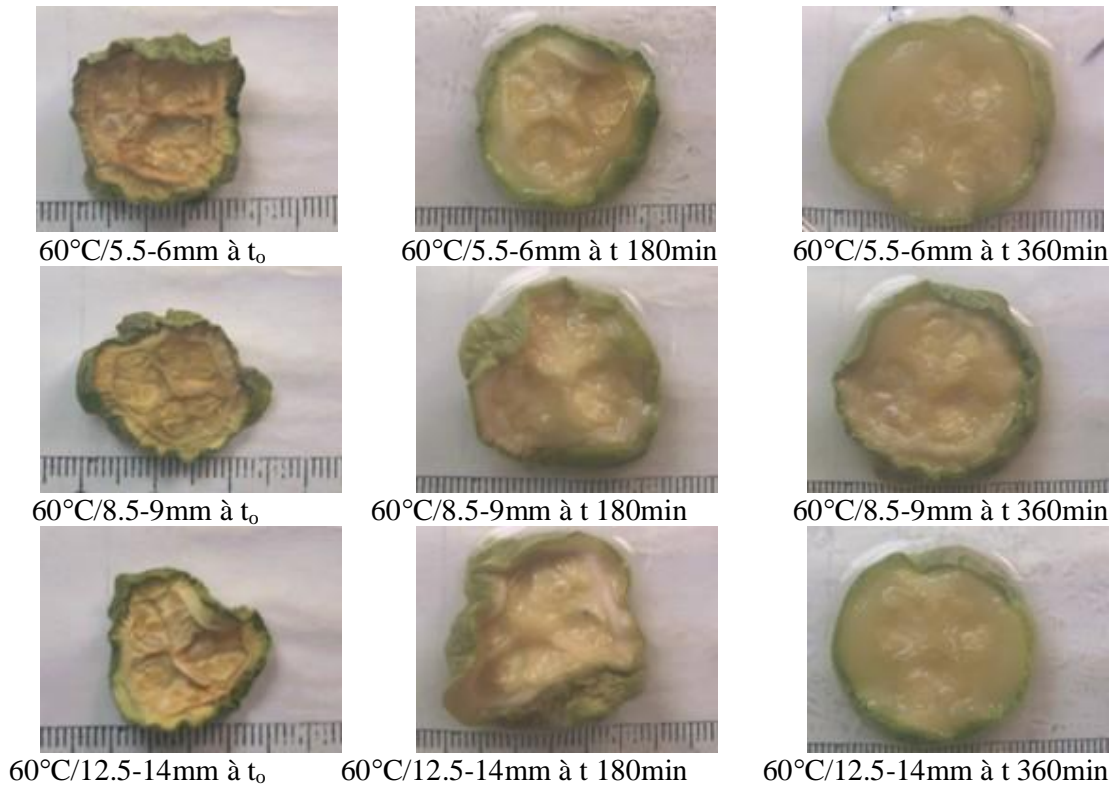
La courgette étant un fruit et l'évolution de la maturité dans les fruits conduit à une hydrolyse des molécules de réserves particulièrement les carbohydrates à haut poids moléculaires tel que l'amidon (CHEFTEL et al.,1978 cités par GENIN & RENE ,1996).

Cette hydrolyse permet donc de libérer des sucres réducteurs qui transportés vers la surface du produit avec l'eau au cours de la première sous phase de séchage et sous l'effet de la température donneront un brunissement non enzymatique. Ce qui conduit à un durcissement de la surface, limitant ainsi le transfert de l'eau en fin de séchage avec ralentissement de son allure (vitesse), ce qui est observé sur les courbes de vitesse de séchage des rondelles épaisses.

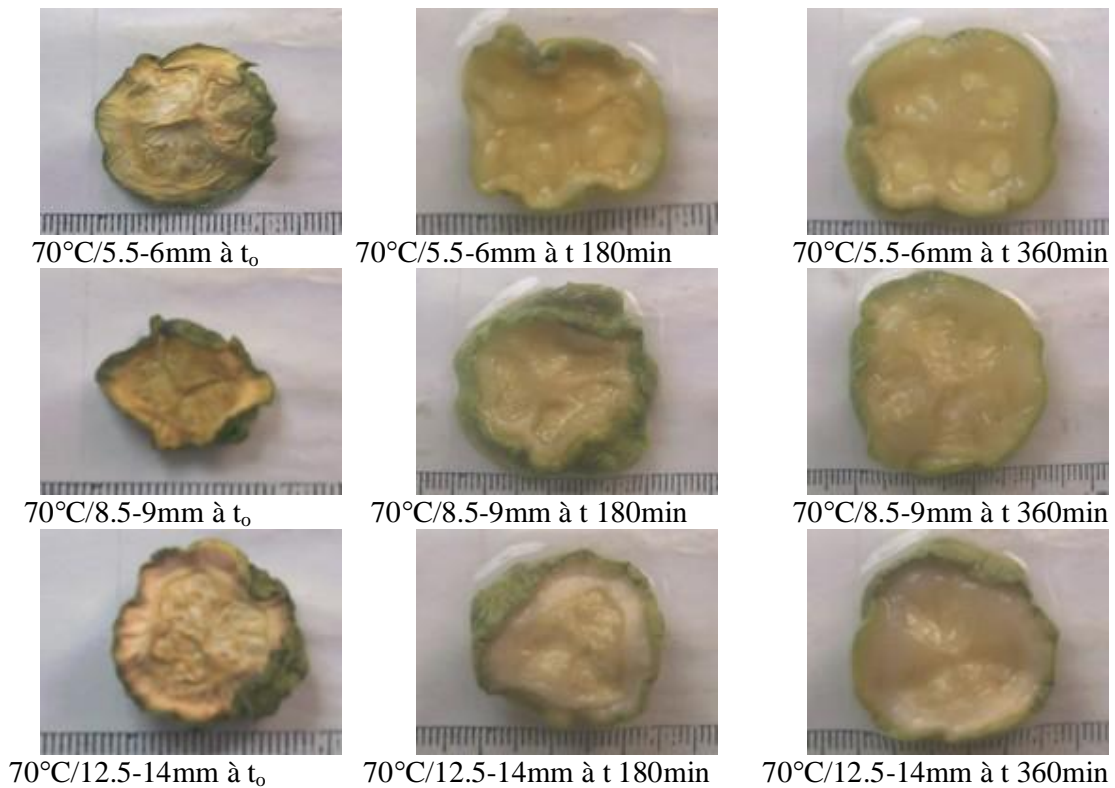
La difficulté d'extraire la quantité d'eau permettant d'atteindre des teneurs en eau résiduelles (finales) basses en un temps plus court est due à la taille des morceaux de découpe .Cette dernière limitant le déplacement de l'eau à partir du cœur vers l'extérieur du produit pour son évaporation en fin de séchage. Ce comportement apparaît sur les figures 25 c, 26 c et 27 c et est illustré par les photos (figure 28).

3-3- Aptitude à la réhydratation de la courgette séchée

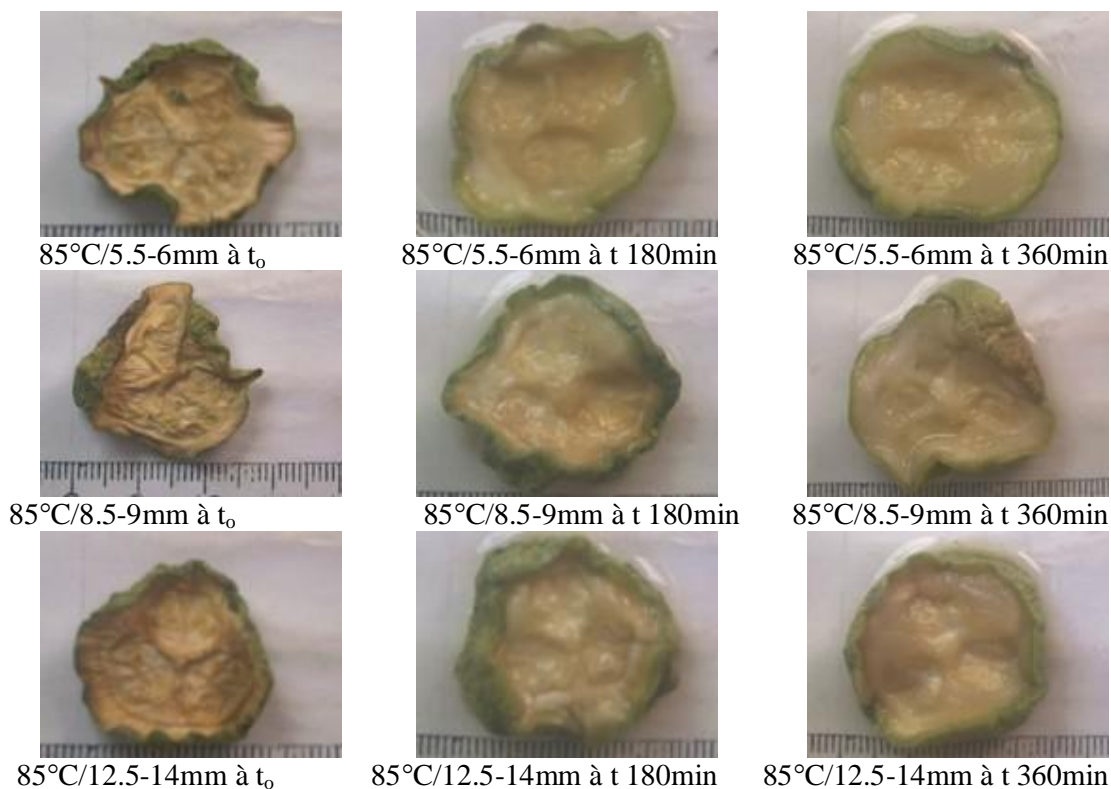
On observe un passage des substances dissoutes dans l'eau de réhydratation qui s'est colorée en brun du à la couleur des rondelles qui ont subis le brunissement non enzymatique au cours



a : Réhydratation des rondelles de courgettes séchées à 60°C coupées en 3 épaisseurs



b : Réhydratation des rondelles de courgettes séchées à 70°C coupées en 3 épaisseurs



c : Réhydratation des rondelles de courgettes séchées à 85°C coupées en 3 épaisseurs

Figure 29 : Prises de vue de l'évolution de la réhydratation des rondelles de courgette séchées à 60 °C (a) ;70 °C (b) et 85 °C (c) coupées aux 3 épaisseurs

de leur séchage. Les plus intenses ont été celles de 12,3 mm à 85°C (ce qui apparaît dans les photos prises avant réhydratation).

Les rondelles de courgettes réhydratées ont repris leur couleur initiale, d'un vert clair de la peau, avec une diminution du rétrécissement. La déformation est restée telle quelle, contrairement à l'épaisseur qui reprend sa taille initiale d'avant séchage au fur et à mesure de l'absorption d'eau.

L'épaisseur des rondelles réhydratées est donnée dans le tableau n°18. Les prises de vues lors des tests de réhydratation sont présentées ci-dessus (figure 29).

Pour la courgette séchée à 70°C, l'eau de réhydratation est légèrement colorée ; contrairement à 85°C où le changement de couleur en brun, du à la coloration du brunissement des rondelles au cours de leur séchage est plus prononcé ce qui est du à l'intensité du brunissement.

Une légère coloration en jaune est observée pour les rondelles séchées 60°C de 5,7mm, de même pour celles de 8,4 mm. Cependant l'eau des rondelles de 12,3 mm est colorée en brun, cela est dû aux composés bruns formés lors du brunissement non enzymatique.

Le tableau 18 suivant résume les différentes valeurs relatives au comportement du légume au cours de sa réhydratation (épaisseur après réhydratation, teneur en eau et taux de réhydratation atteint après réabsorption d'eau).

Tableau 18 : Valeurs des taux de réhydratation atteint par les rondelles de courgette au bout de 6 heures à 29±2°C

T° de séchage	épi de découpe (mm)	Temps de séchage (min)	m moy. rondelles sèches (g)	ép f sec (mm)	épf réh (mm)	X f séché (g/gb.s)	Xréh (g/g b.s)	TR=Xréh/Xi*100 (%)
60°C	5,7±0,2	210	0,34±0,01	2,1	5,5	0,026	5,16	37,7±0,7
	8,4±0,4	350	0,61±0,03	2,68	8,6	0,043	3,29	24,0±1,9
	12,3±0,4	410	0,82±0,04	4,1	9,0	0,044	3,40	24,9±2,5
70°C	5,7±0,2	160	0,31±0,02	2,3	5,0	0,053	5,94	38,0±3,8
	8,4±0,4	300	0,61±0,01	3,27	7,0	0,142	4,25	27,1±0,6
	12,3±0,4	390	0,96±0,02	3,67	9,0	0,063	3,31	21,1±1,3
85°C	5,7±0,2	130	0,34±0,03	1,9	5,5	0,024	5,54	40,8±4,1
	8,4±0,4	225	0,56±0,04	2,57	6,5	0,028	3,80	27,8±0,6
	12,3±0,4	295	0,88±0,03	3,57	8,5	0,029	3,45	25,2±0,7

D'après ces mesures on remarque que les rondelles les plus fines (épaisseur de 5,7mm) se réhydratent le mieux et reprennent leur taille initiale d'avant séchage, ceci est corroboré par ce qui est cité pour la carotte où en séchage classique par air chaud, les plus rapide des séchages conduisent aux meilleures réhydratations et que, le taux de réhydratation est fortement lié à la dénaturation des protéines, qui est fonction des couples temps -températures atteints pendant le séchage (BIMBENET et coll. 2002b).

Etant donné que pour l'épaisseur 5,7 mm à 60 ; 70 et 85 °C ; on observe une légère coloration de l'eau de réhydratation due au passage des solutés du produit et vu les résultats de la cinétique de séchage où ces rondelles ont des temps de séchage relativement courts, moins de brunissement et de croûtage, ce qui laisse supposer que les protéines que contient la courgette (de 1,16 à 1,8 g/100g de partie comestible selon ERARD (2002) et

FAVIER et coll. (1995)) n'ont pas été dénaturées mais l'écrasement et le rétrécissement ont probablement joué un rôle limitant la capacité de réhydratation des rondelles qui est assez faible.

Au contraire, avec les autres rondelles séchées aux trois températures on observe un changement de couleur de l'eau de réhydratation en brun. Cela est dû à la coloration du brunissement des rondelles au cours de leur séchage et probablement à la diffusion des substances dissoutes de la courgette vers l'eau. Au cours du séchage lors de la première sous période, l'eau en s'évaporant entraîne avec lui les substances solubles qui restent en surface favorisant le brunissement.

3-3-1- Effet de la température de séchage sur la réhydratation de la courgette

La réhydratation des rondelles de courgette séchées aux trois températures, aux épaisseurs de $5,7 \pm 0,2$; $8,4 \pm 0,4$ et $12,3 \pm 0,4$ mm est représentée dans les figures 30 a , b et c.

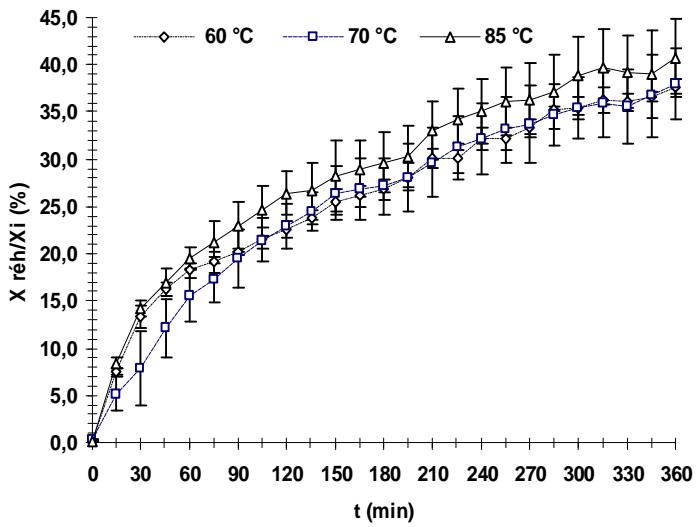
Ces dernières montrent l'allure du taux de réhydratation au cours du temps calculé en pourcent par rapport à la teneur en eau initiale du produit qui est de 13,7 g/g b.s (93,2% b.h) pour les rondelles séchées à 60 et 85 °C et de 15,7 g/g b.s (94,0% b.h) pour celles de 70 °C.

- L'effet de la température de séchage selon que les produits qui sèchent le moins longtemps se réhydratent le plus, apparaît dans le cas de la courgette pour l'épaisseur de 5,8mm à 85 °C dont le taux de réhydratation est plus élevé avec 40,8 %, qui est légèrement supérieur à celui des deux autres températures qui sont de 37,7 et 38,0 % (60 et 70 °C).

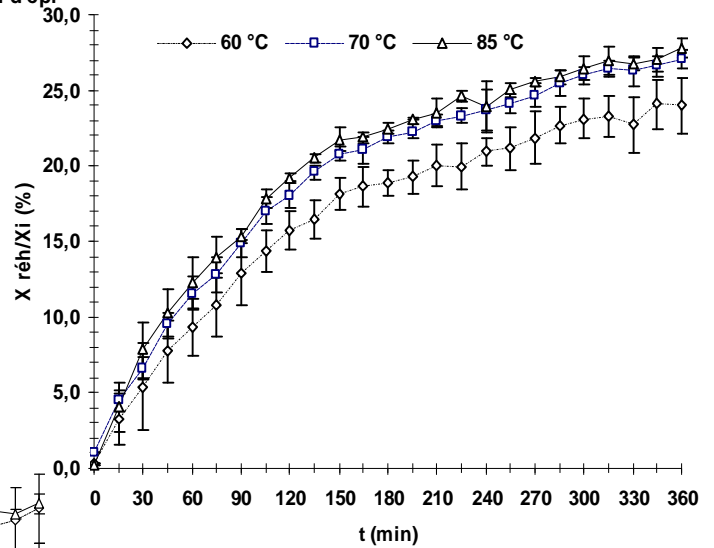
- De même pour l'épaisseur de 8,4 mm où l'effet de la température est apparent à 85 °C qui est le plus élevé avec 27,7 % et à 70°C 27,1 % et enfin le plus faible taux de réhydratation est assuré par la température de 60 °C avec 24,0 %.

- Pour l'épaisseur de 12,3 mm, les taux de réhydratation sont de 24,9 et 25,2 % à 60 et 85 °C et le plus faible taux est de 21,1 % à 70 °C; l'effet de la température est moins apparent que dans les deux autres épaisseurs.

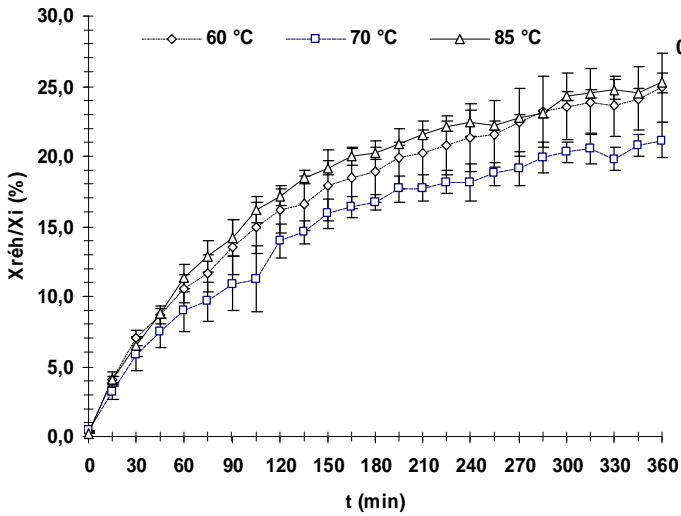
Cependant, le taux de réhydratation pour l'ensemble des rondelles séchées aux trois températures, est assez bas du fait que la teneur en eau atteinte après réhydratation n'arrive pas à récupérer les 50% de l'eau perdue lors du séchage.



a : Effet de la température de séchage sur la réhydratation des rondelles de courgette de 5,7 mm d'épi



b : Effet de la température de séchage sur la réhydratation des rondelles de courgette de 8,4 mm d'épi



c : Effet de la température de séchage sur la réhydratation des rondelles de courgette de 12,3 mm d'épi

Figure 30 : Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation des rondelles de courgette de 5,7mm (a) ; 8,4 mm (b) et 12,3 mm (c) d'épaisseur

L'effet de la température n'est pas assez significatif sur le taux de réhydratation de chacune des rondelles séchées aux trois températures où l'écart entre les différents taux pour une même épaisseur n'est pas important ce qui est apparent sur les courbes de la figure 30 a,b et c.

3-3-2- Effet de la taille de découpe sur la réhydratation de la courgette

Les figures 31 a à c représentent l'effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation des rondelles de courgette coupées en trois épaisseurs (5,7 ; 8,4 et 12,3 mm) et séchées à une température fixe (60 ; 70 ou 85 °C).

Il apparaît que la dimension du légume séché a une influence significative sur l'allure de la réhydratation. Certaines des courbes sont bien distinctes d'une épaisseur à une autre avec des taux de réhydratations différents.

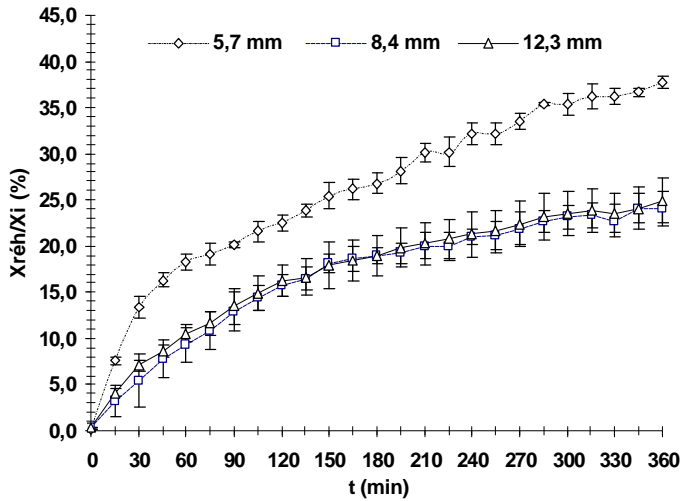
- Les rondelles de la petite épaisseur (5,7±0,2mm) sont celles qui ont données les taux de réhydratation les plus élevés à 60°C de 37,7% dont la durée du temps de séchage est plus courte que les deux autres épaisseurs qui ont présenté des taux de réhydratations faibles avec 24,0 et 24,9 % respectivement (8,4 et 12,3 mm) (voir tableau n°18 et figure 31 a).

- Les plus faibles taux de réhydratation sont ceux des rondelles les plus épaisses (12,9 mm) séchées à 70°C avec 21,1 % seulement. Le taux le plus élevé est assuré par l'épaisseur de 5,7 mm avec 38,0 %, et le taux moyen est assuré par celle de 8,4 mm avec 27,1 % (tableau 18 et figure 31b).

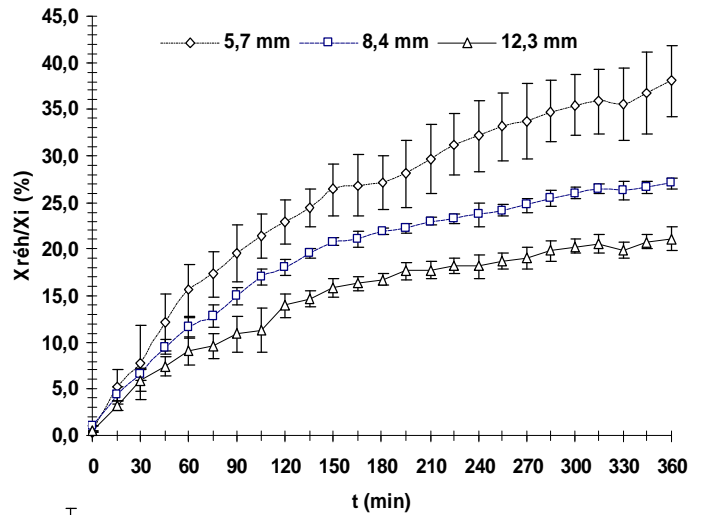
- Les rondelles de 5,7 mm séchées à 85°C assurent le meilleur taux de réhydratation de toutes les rondelles avec 40,8 % , suivi par celles de 8,4 mm avec 27,8 % et enfin le plus faible taux est donné par l'épaisseur de 12,3 mm avec 25,2 % (voir tableau 18 et figure 31c).

Dans tout les cas de figure, l'épaisseur la plus faible a donné les taux de réhydratation les plus élevés, suivi de celle de 8,7 mm (exception à 60°C où il est le plus faible) et enfin les faibles taux de réhydratations sont ceux de 12,9mm qui parait la moins intéressante des trois épaisseurs.

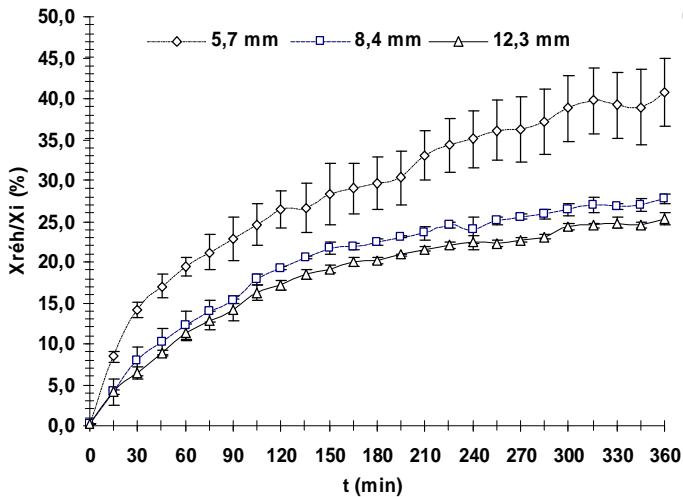
L'effet de l'épaisseur est très significatif dans la mesure où la plus petite épaisseur (5,8mm) assure les taux de réhydratation les plus élevés par rapport à celle qui lui est supérieure (8,7mm) et que l'épaisseur la plus large (12,9 mm).



a : Effet de la taille de découpe sur la réhydratation de rondelles de courgette séchées à 60 °C



b : Effet de la taille de découpe sur la réhydratation de rondelles de courgette séchées à 70 °C



c : Effet de la taille de découpe sur la réhydratation de rondelles de courgette séchées à 85 °C

Figure 31 : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de rondelles de courgette séchées à 60 °C(a); 70 °C (b) et 85 °C (c)

Les courbes de réhydratation évoluent distinctement l'une de l'autre pour les température de séchage de 70 et 85 °C malgré des écarts type assez importants (cas de l'épaisseur 5,7 et

12,3 mm en début de réhydratation). À 60 °C l'effet est moins significatif surtout pour les épaisseurs de 8,7 et 12,9 mm dont les écart types sont confondus et les taux de réhydratation sont les mêmes. Le meilleur effet de découpe est observé sur les courbes séchées à 70 °C (figure 31b).

Conclusion

Le séchage de la courgette montre que l'effet de l'épaisseur ainsi que celui de la température de séchage, sur l'altération du produit et la durée de séjour de ce dernier, sont des facteurs déterminants sur l'évolution de la vitesse de séchage, sur la rétraction et l'aptitude du produit à se réhydrater.

L'effet de la température est plus significatif lors du séchage sur l'épaisseur la plus mince et est plus important sur le taux de rétraction de la même épaisseur et surtout à 85 °C (qui a moins rétréci).

Les critères d'instantanéité et le temps de réhydratation sont des critères importants dans la définition de la qualité du produit déshydraté selon RENE et coll. (1996). La notion de qualité est relative à l'application visée. Un ingrédient pour potage nécessite une grande capacité de réhydratation couplé au caractère d'instantanéité. La qualité du produit fini est définie selon différents critères pour un même produit ayant plusieurs types d'applications Elle est une fonction du traitement technologique subi (nature du procédé physique, paramètres opératoires et conduite du procédé), mais également de l'état de la matière première (variété, origine, état de maturité, pratiques culturales, prétraitements).

Les critères retenus par RENE et coll. (1996), dans leur étude sont la couleur et la texture de la courgette.

La courgette est un fruit dont l'état de maturité correspond au taux d'hydrolyse des molécules de réserves (molécules glucidiques de forte masse moléculaire) en composés de masse moléculaires plus faibles (sucres). Lors de la maturation du fruit sa composition évolue vers une teneur croissante en molécules de faible masse moléculaire.

L'observation d'une dégradation de la couleur verte et un jaunissement du produit, s'expliquent par une altération des pigments chlorophylliens permettant aux pigments caroténoïdes d'être révélés (CHEFTEL et al., 1978 cités par RENE et coll. (1996).

L'augmentation de l'oxygène dans l'enceinte de traitement par la chaleur (séchage) peut être le facteur responsable de ces phénomènes en favorisant l'action d'une lipoxydase (CHEFTEL et al.,1978 cités par RENE et coll.(1996).

Les rondelles de courgettes apparemment absorbent moins l'eau que la carotte, avec diminution de l'intensité du rétrécissement, mais la déformation est restée comme pour la carotte dans certains cas, et dans d'autres la reprise de forme est quasi –totale avec gain en poids et en volume et reprise de l'épaisseur initiale d'avant séchage (cas de l'épaisseur 5,7 mm à 60 et 85 °C et moins à 70 °C. l'épaisseur 8,4 et 12,3 mm à 60°C et 8,4 mm 70 °C).

L'échantillon plus épais utilise plus d'énergie que celui qui est mince, ceci reflète la faible capacité de réhydratation et un temps plus lent pour sécher les échantillons plus épais. De même pour la rétraction (diminution de l'épaisseur) qui conduit à une augmentation de l'énergie nécessaire pour le transfert de l'eau (WANG et XI ,2004). Ceci corrobore les effets observés sur les rondelles épaisses par leur brunissement et l'altération éventuelle du tissu qui conduit à un faible taux de réhydratation et les résultats intéressants obtenus avec l'épaisseur la plus mince séchée à 85 °C.

Une relation apparaît comme un phénomène de cause à effet sur la rondelle de 5,7mm d'épaisseur séchée à 85 °C, qui présente la vitesse de séchage initiale la plus élevée, la durée de séjour la plus courte pour atteindre la teneur en eau ciblée et présente un taux de rétraction le plus bas ayant pour conséquence le taux de réhydratation le plus élevé.

D'après les résultats obtenus des cinétiques de séchage de la courgette et l'étude de son comportement au cours et après séchage, nous pouvons conclure qu'il existe une interrelation entre température de l'air, épaisseur du produit et leurs effets cumulée sur la durée et la vitesse de séchage, le taux de rétraction et leurs conséquences sur le taux de réhydratation des légumes séchés.

4- Séchage et comportement du cardon

4-1-Cinétique de séchage

4-1-1-Effet de la température sur la cinétique et la vitesse de séchage

Le résultat de l'effet de la température de séchage sur la cinétique et vitesses de séchage de tranches de cardon est exprimé par des courbes, qui montrent l'influence de ce paramètre sur le comportement de chaque tranche en fonction de sa dimension. Les figures 32 a, 33 a et 34 a de la cinétique de séchage $X_m=f(t_m)$ sont présentées en annexe 1.

Les figures 32 (b et c), 33 (b et c) et 34 (b et c) représentent l'évolution de la vitesse de séchage $dX/dt=f(t_m)$ et $dX/dt=f(X_m)$ du cardon et montrent l'effet de la température de séchage (60 ; 70 et 85°C) sur chacune des trois taille de découpe du légume (5,8±0,6 ; 8,8±0,6 et 32,0±1,2 mm).

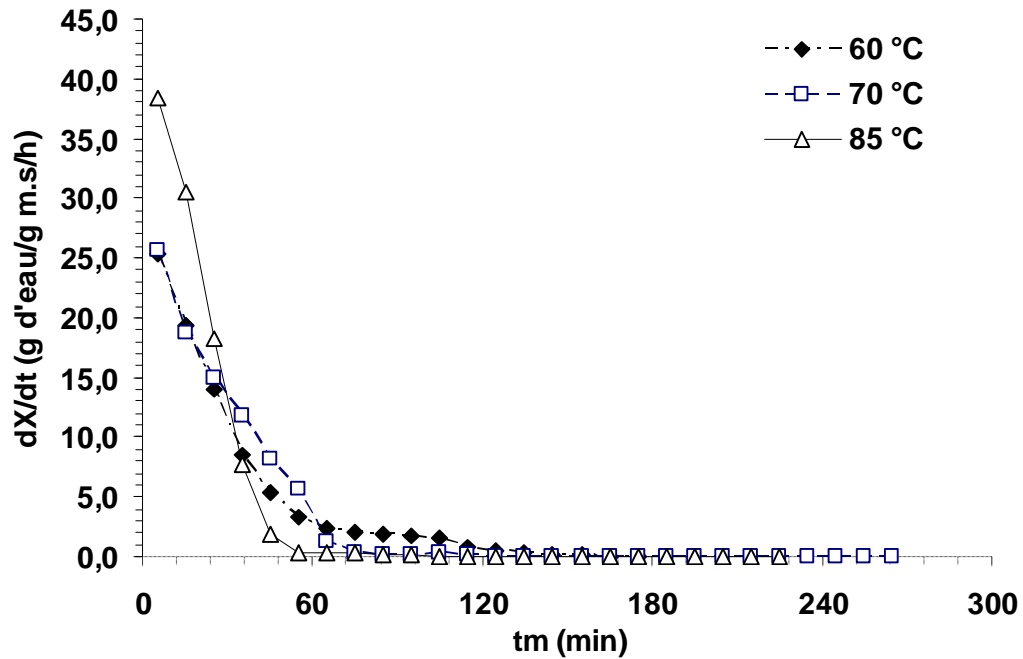
L'allure générale des courbes de cinétique et de vitesses de séchage (figures 32,33 et 34) montre que le séchage se déroule en phase décroissante en l'absence de la période de mise en température et de la période à allure constante. Ce phénomène est rapporté en littérature et mis en évidence par plusieurs auteurs à propos des produits alimentaires, notamment les légumes.

La présence d'une seule phase à allure décroissante montre qu'elle peut être subdivisée en deux sous périodes selon la température de l'air et l'épaisseur des morceaux.

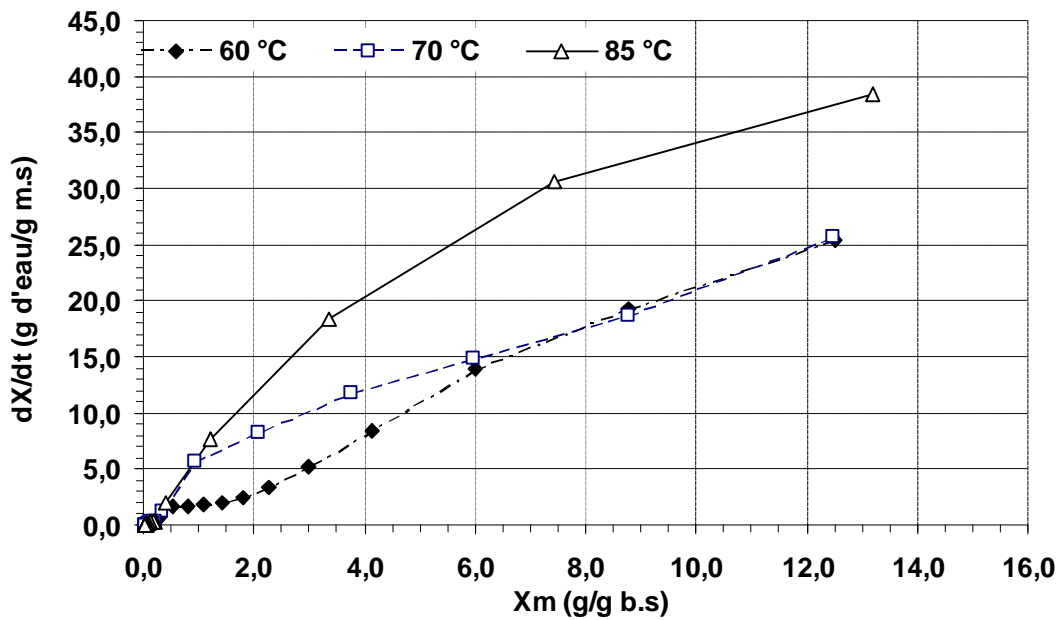
►► Sur les figures 32 b et 32 c de l'épaisseur 5,8±0,6 mm, les courbes démarrent au temps initial ($t_{mi} = 5\text{min}$) avec des vitesses initiales $(-dX/dt)_i$ de séchage différentes où celle de 85 °C est la plus élevée avec 38,35 g d'eau/g m.s/ h correspondant à une teneur en eau initiale X_{mi} de 13,2 g/g b.s (92,96 % b.h), suivie par celles de 70 et 60 °C avec 25,65 et 25,35 g d'eau/g m.s/h et une X_{mi} de 12,49 et 12,51 g/g b.s (92,59 et 92,6 % b.h).

Au cours du séchage les deux courbes de 60 et 70 °C évoluent de façon séparée par rapport à celle de 85°C du début du séchage jusqu'aux basses teneurs en eau.

L'évolution des courbes de 70 et 60 °C (figure 32 b et c), montre que l'effet de la température est atténué dès le début du séchage. Les deux courbes évoluent à des vitesses et teneurs en eau proches au début du séchage jusqu'à t_m de 25 min et X_m proche de 6,0 g/g b.s (85,71 % b.h) et la vitesse de 14 et 14,8 g/g m.s/h où les vitesses de séchage des deux courbes sont distinctes et l'effet de la température s'accroît.



b : Vitesse de séchage de tranches de cardon de 5,8 mm d'épaisseur ; $-dX/dt=f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de tranches de cardon de 5,8 mm d'épaisseur ; $-dX/dt=f(X_m)$

Figure 32 : Effet de la température sur la vitesse de séchage de tranches de cardon de 5,8 mm d'épaisseur : (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

Ensuite la décroissance devient plus rapide à 60 °C qu'à 70 °C., puis l'effet devient important où celle de 70 °C montre une vitesse de séchage plus importante. Les trois courbes évoluent séparément à des vitesses et teneurs en eau différentes montrant l'importance de l'effet de la température de l'air sur ces tranches jusqu'aux basses teneurs en eau résiduelles à partir des environs de 0,5g/g b.s à la fin du séchage.

► Les courbes de séchage des trois températures montrent que la teneur en eau moyenne sur base sèche <10 g/g b.s est atteinte à des temps différents Δt_1 2h 25min (145 min), 1h55min (115min) et 1h35min (95min) avec X_{m1} =0,099 ; 0,088 et 0,093 g/g b.s (9,0; 8,09 et 8,5 % sur b.h) respectivement à 60 ,70 et 85 °C.

Cette durée est suffisante pour éliminer ΔX_{m1} de 12,41; 12,40 et 13,10 g d'eau /g de masse sèche soit 92,54; 92,537 et 92,91 % sur base humide de la totalité de l'eau contenue dans le cardon.

La teneur en eau moyenne finale est atteinte après 30 min; 2h 30 min(150 min) et 2h10 min (130 min) de plus pour éliminer respectivement 3,7 ; 5,6 et 6,7 % b.s (3,57; 5,3 et 6,28 % b.h) d'eau restante de X_{m1} jusqu'à X_{mf} de 0,062 ; 0,032 et 0,026 g/g b.s (5,84 ; 3,1 et 2,53 % b.h).

Le temps Δt_t de 2 h55min ; 4h 25 min et 3h 15 min (175; 265 et 225 min) correspond à l'évaporation de ΔX_{mt} 12,45; 12,46 et 13,17 g d'eau /g de m.s soit 92,56 ; 92,57 et 92,94 % b.h (g d'eau évaporée par 100 g de masse humide) au cours du séchage de ces tranches de cardon de 5,8 mm d'épaisseur.

La teneur en eau de départ du produit est plus élevée pour le séchage à 85°C qui est de 94,25 % sur base humide (16,39 g/g b.s) et de 93,6 % sur base humide (14,625 g/g b.s) pour celle de 60 et 70 °C .

L'effet de la température trouve son importance dans la durée de séchage respective qui est plus courte à 85 °C que pour les deux autres.

► Le changement de pente est observé (figure 32 b et 32 c) à 45min (60 °C) ,55 min (70 °C) et à 35min (85 °C) de séchage, il correspond à X_m de 2,99 ; 0,93 et 1,21 g/g b.s (74,94 ; 48,19 et 54,75 % b.h) et à une vitesse de 5,28 ; 5,64 et 7,68 g d'eau/g m.s/h respectivement. Ces points correspondent à l'évaporation de 9,52; 11,56 et 11,99 g/g b.s soit 90,49 ; 92,04 et 92,3 % sur base humide.

La vitesse de séchage montre une évaporation plus importante au début avec $(-dX/dt)_i$ élevée jusqu'au point d'inflexion avec changement de l'allure de la courbe et abaissement de la vitesse au fur et à mesure que la teneur en eau résiduelle diminue.

La diminution de la quantité d'eau évaporée à partir du point d'inflexion, ainsi que la faible vitesse à partir de ce changement de pente, nécessite une durée plus longue jusqu'à X_{mf} qui est de 2h 10min (130min) à 60 °C; 3h 30 min (210 min) à 70 °C et 3h 10 min (190 min) à 85 °C pour évaporer 74,55 ; 47,37 et 54,13 % sur base humide. Ce temps correspond à 74,3 ; 79,2 et 84,4 % de la durée totale respective (60 et 70 °C, et 85 °C) du séchage.

►► Sur les figures 33 b et 33 c de l'épaisseur $8,8 \pm 0,6$ mm, les courbes démarrent au temps initial ($t_{mi} = 5$ min) avec des vitesses initiales $(-dX/dt)_i$ de séchage différentes où celle de 85 °C est la plus élevée avec 26,35 g d'eau/g m.s/ h correspondant à une teneur en eau initiale X_{mi} de 14,2 g/g b.s (93,42 % b.h), suivie par celles de 70 et 60 °C avec 20,25 et 16,65 g d'eau/g m.s/h et une X_{mi} de 12,94 et 13,24 g/g b.s (92,83 et 92,98 % b.h).

Au cours du séchage les trois courbes évoluent de façons séparées et distinctes l'une par rapport aux deux autres du début du séchage jusqu'aux basses teneurs en eau inférieures à 0,8 g/g b.s (44,44 % b.h). Cette évolution à des vitesses et teneurs en eau différentes montre l'importance de l'effet de la température de l'air du séchage.

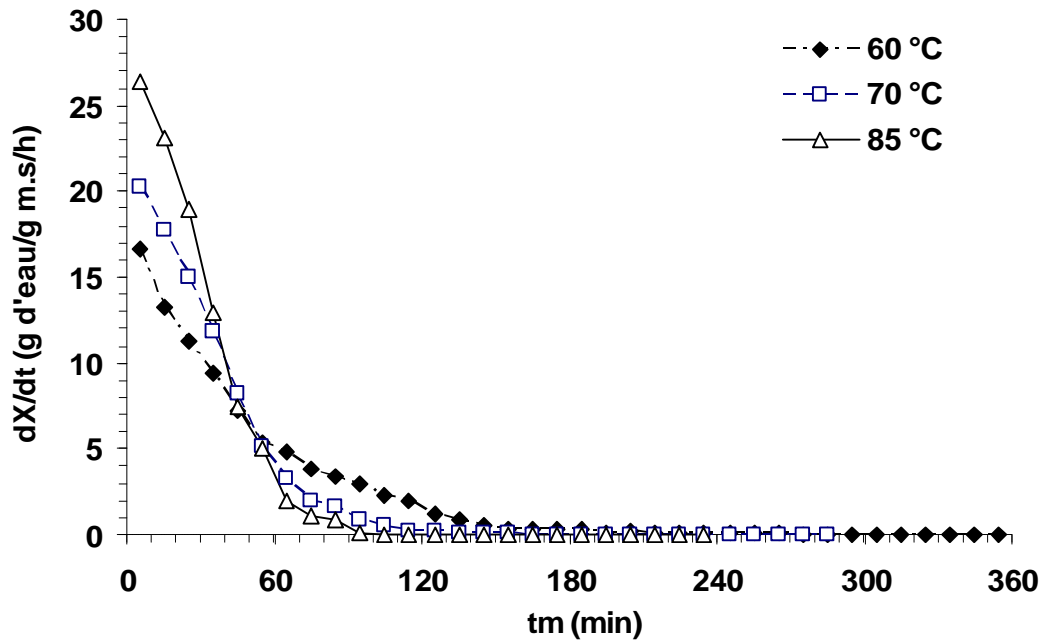
► Les courbes de séchage des trois températures montrent que la teneur en eau moyenne sur base sèche < 10 g/g b.s est atteinte à des temps différents Δt_1 2h 55min (275 min), 2h35min (155min) et 1h35min (95min) avec $X_{m1} = 0,093$; 0,09 et 0,1 g/g b.s (8,5; 8,26 et 9,09% sur b.h) respectivement à 60 ,70 et 85°C.

Cette durée est suffisante pour éliminer ΔX_{m1} de 13,15 ; 12,85 et 14,10 g d'eau /g de masse sèche soit 92,93; 92,78 et 93,38 % sur base humide de la totalité de l'eau contenue dans le cardon.

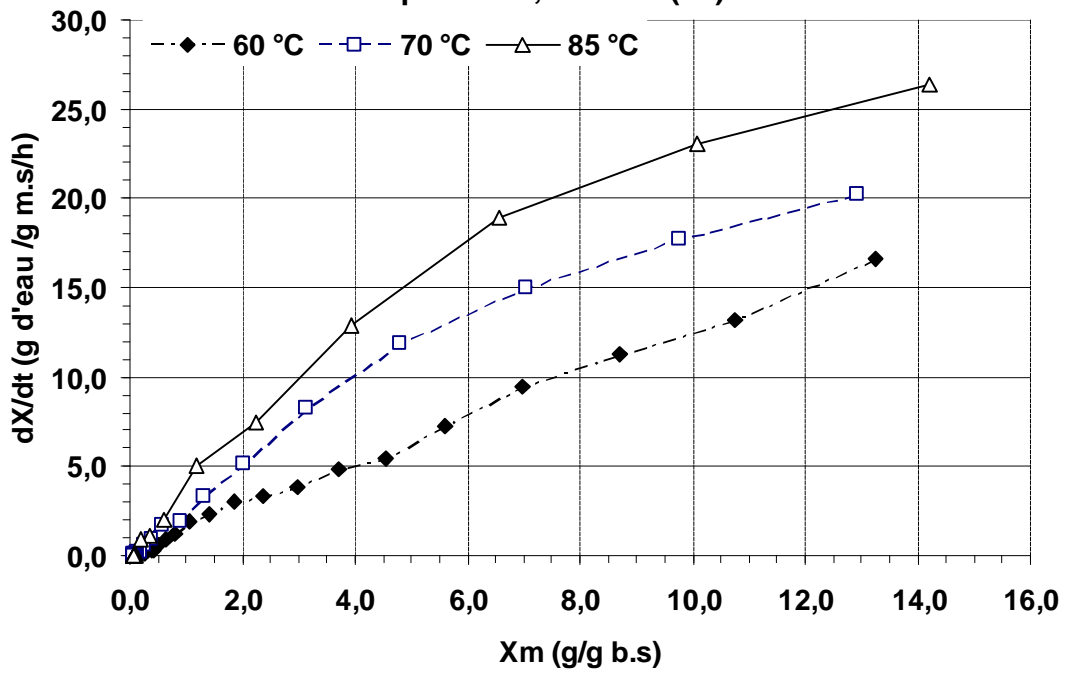
La teneur en eau moyenne finale est atteinte après 80 min; 2h 10 min(130 min) et 2h20 min (140 min) de plus pour éliminer respectivement 2,1 ; 4,2 et 2,5 % b.s (2,06; 4,03et 2,44 % b.h) d'eau restante de X_{m1} jusqu'à X_{mf} de 0,072 ; 0,048 et 0,075 g/g b.s (6,72 ; 4,58et 6,98 % b.h).

Le temps Δt_t de 5 h55min ; 4h 45 min et 3h 55 min (355; 285 et 235 min) correspond à l'évaporation de ΔX_{mt} 13,17; 12,89 et 14,12 g d'eau /g de m.s soit 92,94 ; 92,80 et 93,39 % b.h au cours du séchage de ces tranches de cardon de 8,8 mm d'épaisseur.

L'effet de la température est important dont la durée de séchage respective est plus courte à 85 °C que pour les deux autres, dans le cas de ces tranches de 8,8 mm.



b : Vitesse de séchage de tranches de cardon de 8,8 mm d'épaisseur ; $-dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de tranches de cardon de 8,8 mm d'épaisseur ; $-dX/dt = f(X_m)$

Figure 33 : Effet de la température sur la vitesse de séchage de tranches de cardon de 8,8 mm d'épaisseur : (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

► Le changement de pente est observé (figure 33 b et 33 c) à 55min (60 °C) ,65 min (70 °C) et à 55min (85 °C) de séchage, il correspond à X_m de 4,55 ; 1,33 et 1,18 g/g b.s (81,99 ; 57,08 et 54,13 % b.h) et à une vitesse de 5,40 ; 3,30 et 5,01 g d'eau/g m.s/h respectivement. Ces points correspondent à l'évaporation de 8,69; 11,61 et 13,01 g/g b.s soit 89,69 ; 92,07 et 92,86% sur base humide.

La vitesse de séchage montre une évaporation plus importante au début avec $(-dX/dt)_i$ élevée jusqu'au point d'inflexion avec changement de l'allure de la courbe et abaissement de la vitesse au fur et à mesure que la teneur en eau résiduelle diminue.

La diminution de la quantité d'eau évaporée à partir du point d'inflexion, ainsi que la faible vitesse à partir de ce changement de pente, nécessite une durée plus longue jusqu'à X_{mf} qui est de 5h 00min (300min) à 60 °C; 3h 40 min (220 min) à 70 °C et 3h 00 min (180 min) à 85 °C pour évaporer 81,75 ; 56,14 et 52,61 % sur base humide. Ce temps correspond à 84,5 ; 77,2 et 76,6 % de la durée totale respective (60 et 70 °C, et 85°C) du séchage.

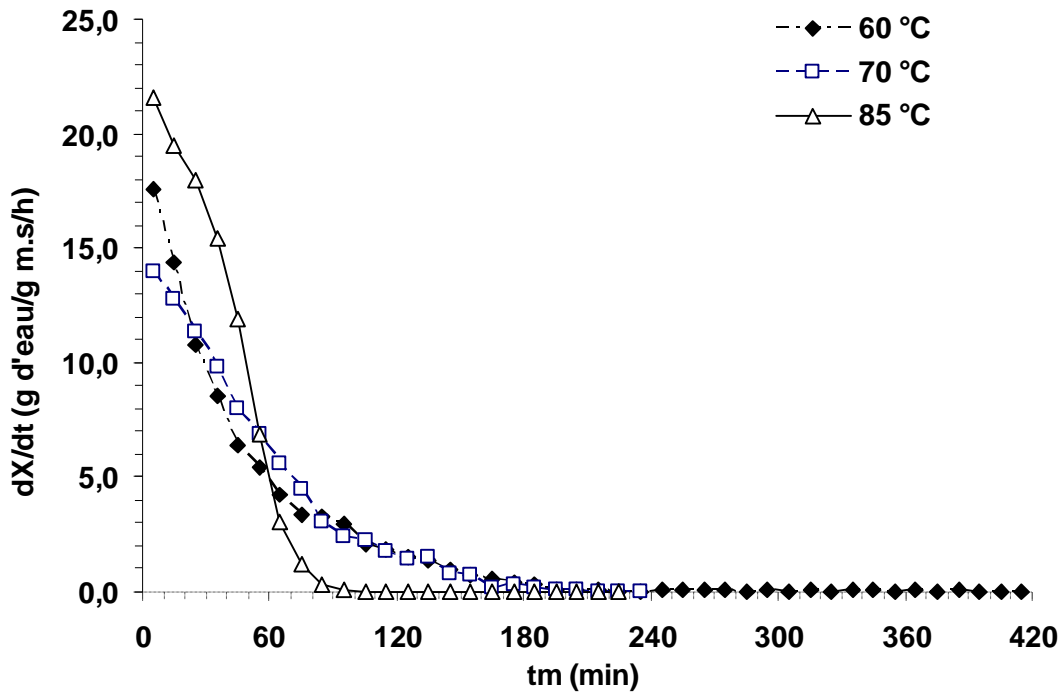
►► Sur les figures 34 b et 34 c de l'épaisseur $32 \pm 1,2$ mm, les courbes démarrent au temps initial ($t_{mi} = 5$ min) avec des vitesses initiales $(-dX/dt)_i$ de séchage différentes où celle de 85 °C est la plus élevée avec 21,55 g d'eau/g m.s/ h correspondant à une teneur en eau initiale X_{mi} de 14,6 g/g b.s (93,59 % b.h), suivie par celles de 60 °C avec 17,55 et 70 °C 13,95 g d'eau/g m.s/h et une X_{mi} de 13,16 et 13,46 g/g b.s (92,94 et 93,08 % b.h).

Au cours du séchage les deux courbes de 60 et 70 °C évoluent de façon séparée par rapport à celle de 85°C du début du séchage jusqu'aux basses teneurs en eau.

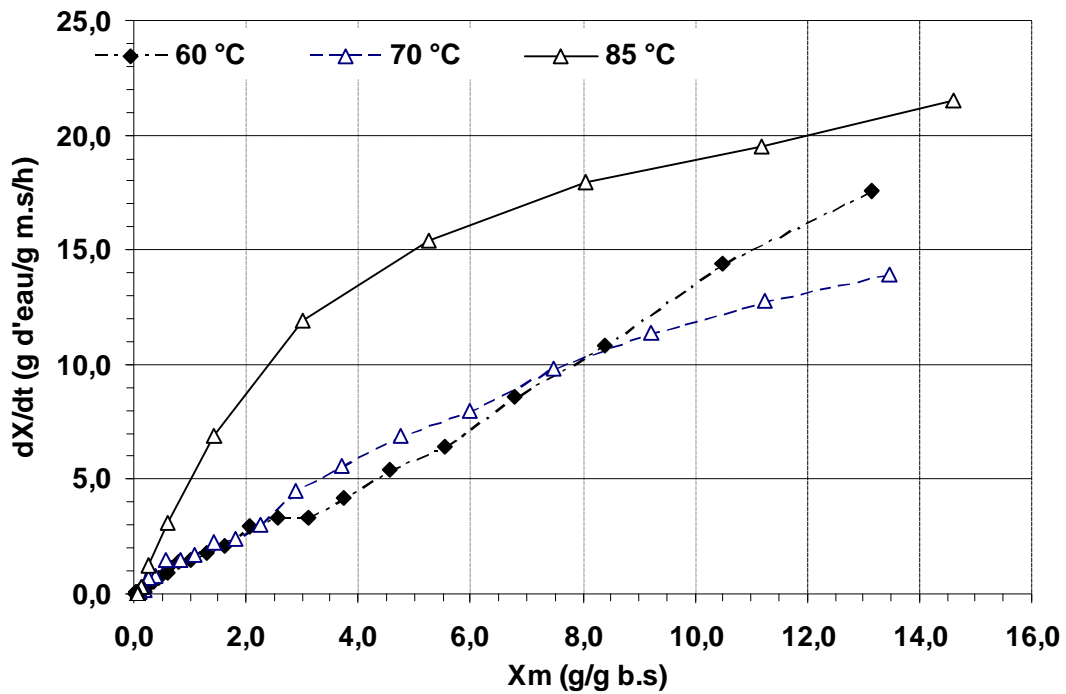
L'évolution des courbes de 70 et 60°C (figure 34 a et c), montre que l'effet de la température est inversé du début du séchage jusqu'au $t_m = 25$ min où elles se croisent entre X_m de 8 et 7, 5 de cette teneur. Ensuite la décroissance devient plus rapide à 60 °C qu'à 70°C., puis l'effet de vient important où celle de 70°C montre une vitesse de séchage plus importante. Les vitesses de séchage des deux courbes sont distinctes et l'effet de la température est apparent. Elles se confondent à environ 2g/g b.s (66,67 % b.h) jusqu'à la fin du séchage.

Les trois courbes évoluent séparément à des vitesses et teneurs en eau différentes montrant l'importance de l'effet de la température de l'air sur ces tranches jusqu'aux basses teneurs en eau résiduelles à partir des environs de 0,5 g/g b.s à la fin du séchage.

Cette évolution à des vitesses et teneurs en eau différentes montre l'importance de l'effet de la température de l'air du séchage



b : Vitesse de séchage de tranches de carbon de 32 mm de longueur ; $-dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de tranches de carbon de 32 mm de longueur ; $-dX/dt = f(X_m)$

Figure 34 : Effet de la température sur la vitesse de séchage de tranches de carbon de 32,0 mm de longueur : (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

► Les courbes de séchage des trois températures montrent que la teneur en eau moyenne sur base sèche <10 g/g b.s est atteinte à des temps différents Δt 4h 55min (295 min), 3h15min (195min) et 1h35min (95min) avec $X_{m1}=0,099$; 0,093 et 0,076 g/g b.s (9,01; 8,51 et 7,06% sur b.h) respectivement à 60 ,70 et 85°C.

Cette durée est suffisante pour éliminer ΔX_{m1} de 13,06; 13,37 et 14,52 g d'eau /g de masse sèche soit 92,89; 93,04 et 93,56 % sur base humide de la totalité de l'eau contenue dans le cardon.

La teneur en eau moyenne finale est atteinte après 2h (120 min); 40 min et 2h10 min (130 min) de plus pour éliminer respectivement 6,8 ; 2,7 et 2,6 % b.s (6,37; 2,63 et 2,53 % b.h) d'eau restante de X_{m1} jusqu'à X_{mf} de 0,031 ; 0,066 et 0,05 g/g b.s (3,01 ; 6,19 et 4,76 % b.h).

Le temps Δt de 6 h55min ; 3h 55 min et 3h 45 min (415; 235 et 225 min) correspond à l'évaporation de ΔX_{mt} 13,13; 13,40 et 14,55 g d'eau /g de m.s soit 92,92 ; 93,05 et 93,57 % b.h (masse humide) au cours du séchage de ces tranches de cardon de 32,0 mm de longueur.

L'effet de la température est important dont la durée de séchage respective montre qu'elle est plus courte à 85 °C que pour les deux autres, dans le cas de ces tranches de 32,0 mm.

► Le changement de pente est observé (figure 34 b et 34 c) à 65min (60 °C) ,75 min (70 °C) et à 45min (85 °C) de séchage, il correspond à X_m de 3,75 ; 2,88 et 3,00 g/g b.s (78,95 ; 74,23 et 75,00 % b.h) et à une vitesse de 4,20 ; 4,50 et 11,94 g d'eau/g m.s/h respectivement. Ces points correspondent à l'évaporation de 9,45; 11,32 et 10,17 g/g b.s soit 90,04 ; 91,88 et 91,05% sur base humide.

La vitesse de séchage montre une évaporation plus importante au début avec $(-dX/dt)_i$ élevée jusqu'au point d'inflexion avec changement de l'allure de la courbe et abaissement de la vitesse au fur et à mesure que la teneur en eau résiduelle diminue.

La diminution de la quantité d'eau évaporée à partir du point d'inflexion, ainsi que la faible vitesse à partir de ce changement de pente, nécessite une durée plus longue jusqu'à X_{mf} qui est de 5h 50min (350min) à 60 °C; 2h 40 min (160 min) à 70 °C et 3h 00 min (180 min) à 85 °C pour évaporer 78,81 ; 73,75 et 74,68 % sur base humide. Ce temps correspond à 84,3 ; 68,1 et 80,0 % de la durée totale respective (60 et 70 °C, et 85°C) du séchage.

4-1-2- Effet de la dimension sur la vitesse de séchage

Les figures 35a, 36a et 37a de la cinétique de séchage $X_m=f(t_m)$ sont présentées en annexe 1.

►► Pour montrer l'effet de la taille de découpe sur les cinétiques et vitesses de séchage des tranches de cardon séchées à 60 °C , la figure 35 (b et c) montre un effet important où les courbes des trois tailles de découpe évoluent distinctement l'une de l'autre avec des vitesses initiales différentes de 25,35 ; 16,65 et 17,55 g/g m.s/h correspondant à des teneurs en eau initiales ($t_{mi} = 5$ min) de 12,51 ; 13,24 et 13,16 g/g b.s (92,6 ; 92,98 et 92,94 % b.h).

Il ressort que la vitesse la plus élevée est assurée par l'épaisseur la plus fine (5,8 mm) suivie par celle de 32,0 mm et la plus faible est assurée par l'épaisseur 8,8 mm. Cet effet inversé est valable juste pour les 25 min du début du séchage, ensuite l'épaisseur de 8,8 mm assure des vitesses de séchage plus élevée que la tranche de 32,0 mm jusqu'à une teneur voisine de 2,5 g/g b.s où les trois courbes se confondent avec diminution probable de l'effet de la taille de découpe.

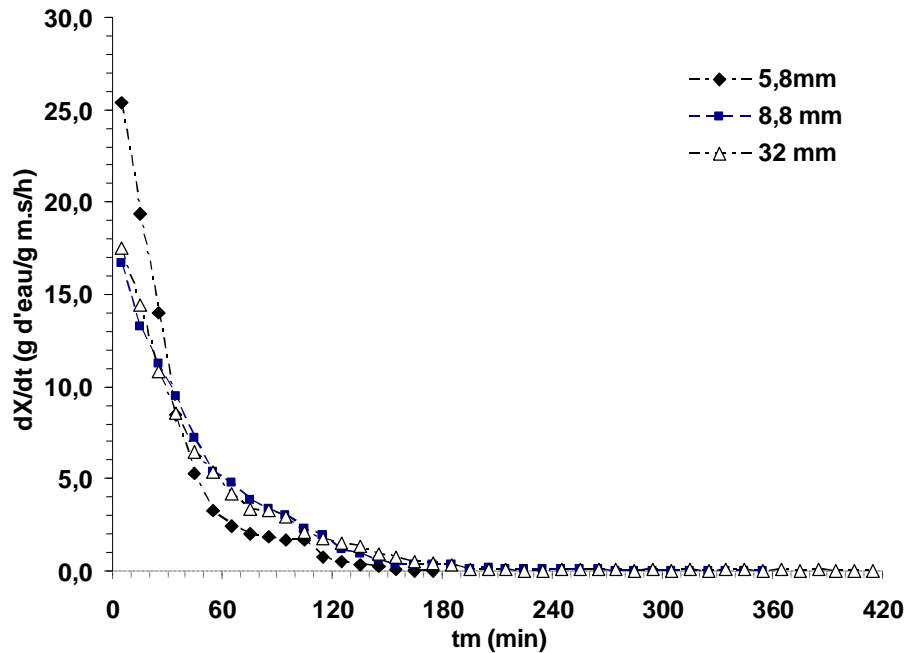
La durée de séchage suffisante pour atteindre X_{m1} et X_{mf} est plus courte avec 5,8 mm que celle de 8,8 mm et la plus longue durée est celle de 32,0 mm.

Le temps mis à atteindre le point d'inflexion est plus court (45 min) avec 5,8 mm pour une quantité d'eau évaporée (9,52 g/g b.s soit 90,49 % b.h) plus élevée que celles des épaisseurs de 8,8 et 32,0 mm qui assurent un temps de 55 et 65 min et ΔX_m moins important (8,69 et 9,45 g/g b.s soit 89,68 et 90,43 % b.h). Le temps de séchage le plus long est assuré par la découpe 32,0 mm pour une évaporation supérieure à celle de 8,8 mm et moins importante que celle de 5,8 mm.

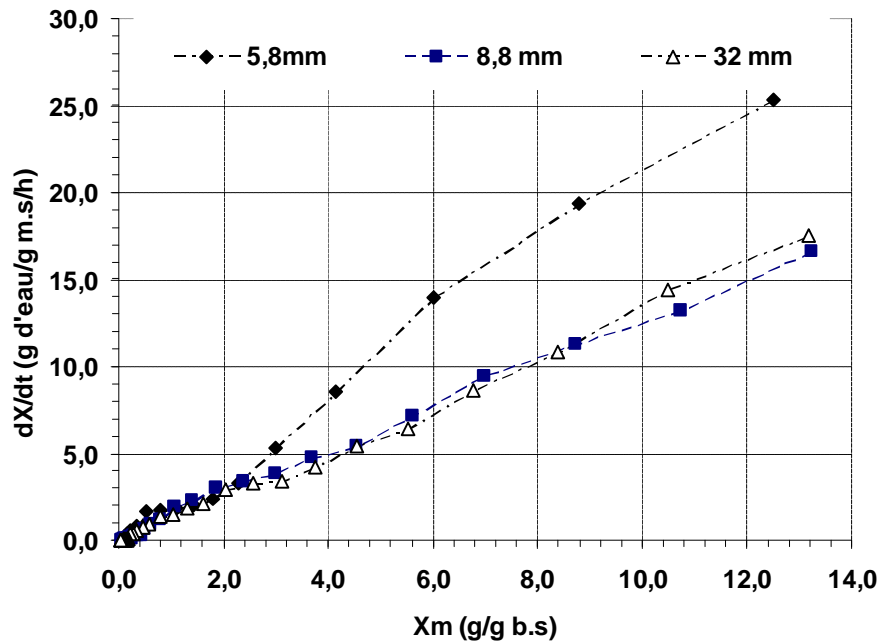
La difficulté d'extraire la quantité d'eau restante après le point de changement de pente est apparente chez la tranche longue de 32,0 mm que chez les deux autres. En 5h 50 min il est évaporée 3,72 g/g b.s (78,81 % b.h) avec 32,0 mm à comparer avec celle de 8,8 mm qui assure une évaporation de 4,48 g/g b.s (81,75 % b.h) en 5h et celle de 5,8mm assure une élimination de 2,93 g/g b.s (74,55 % b.h) en 2h 10 min seulement. Les temps respectifs de cette évaporation représentent la part la plus importante de la durée totale du séchage jusqu'à X_{mf} .

►► L'effet de la taille de découpe sur les cinétiques et vitesses de séchage des tranches de cardon séchées à 70 °C sur la figure 36 (b et c) qui montre un effet important où les courbes

des trois tailles de découpe évoluent distinctement l'une de l'autre avec des vitesses initiales différentes de 25,65 ; 20,25 et 13,95 g/g m.s/h correspondant à des teneurs en eau initiales ($t_{mi} = 5$ min) de 12,49 ; 12,94 et 13,46 g/g b.s (92,59 ; 92,83 et 93,08 % b.h).

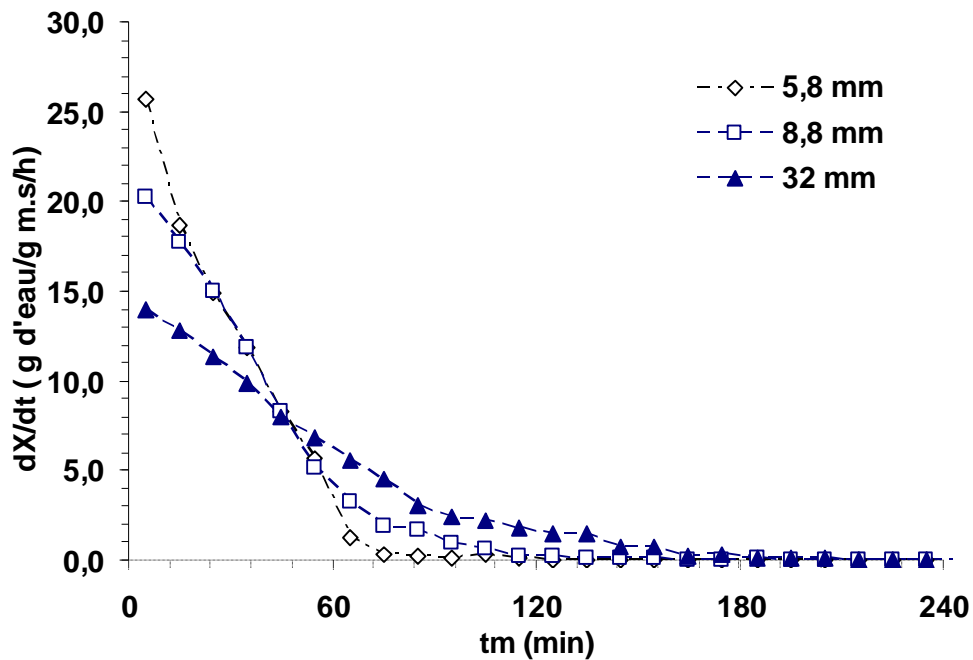


b : Vitesse de séchage de tranches de carton à 60 °C ; $-dX/dt = f(t_m)$

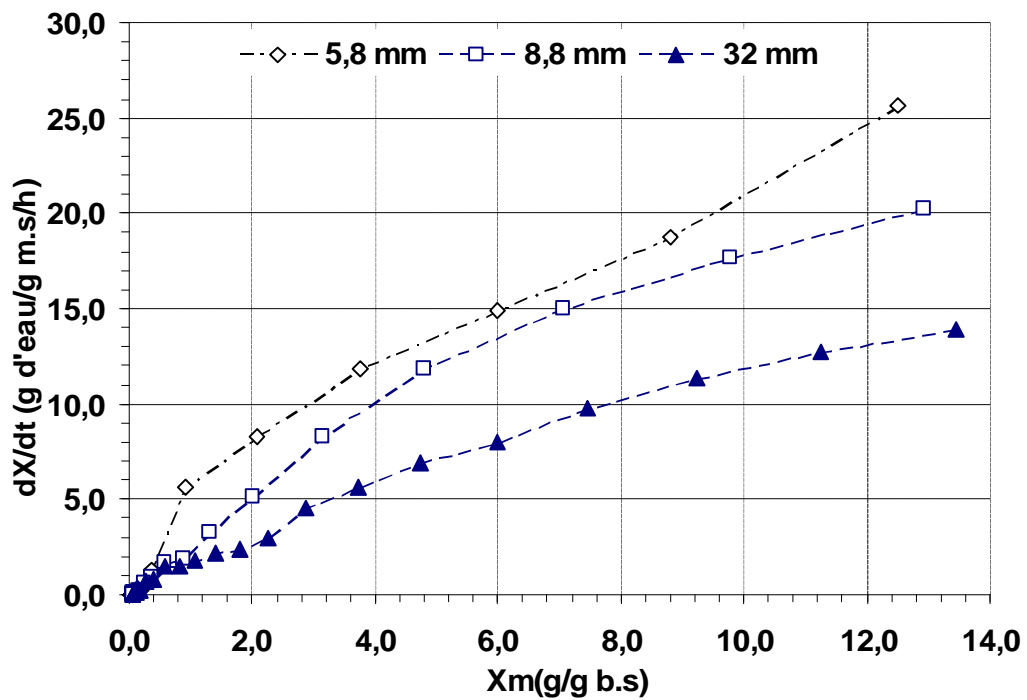


c : Vitesse de séchage de tranches de carton à 60 °C ; $-dX/dt = f(X_m)$

Figure 35 : Effet de la taille de découpe sur la vitesse de séchage de tranches de carton séchées à 60 °C : (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$



b : Vitesse de séchage de tranches de cardon à 70 °C ; $-dX/dt=f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de tranches de cardon à 70 °C ; $-dX/dt = f(X_m)$

Figure 36 : Effet de la taille de découpe sur la vitesse de séchage de tranches de cardon séchées à 70 °C : (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

Il ressort que la vitesse la plus élevée est assurée par l'épaisseur la plus fine 5,8 mm suivie par celle de 8,8 mm et la plus faible est assurée par la tranche de 32,0 mm. Cet effet de la taille de découpe est valable du début du séchage jusqu'à une teneur voisine de 0,6 g/g b.s où les trois courbes se confondent avec diminution probable de l'effet.

La durée de séchage suffisante pour atteindre X_{m1} est plus courte avec 5,8 mm que celle de 8,8 mm et la plus longue durée est celle de 32,0 mm. Cependant X_{mf} est atteinte plutôt avec 32,0 mm suivie par 5,8 mm et enfin celle de 8,8 mm est plus longue.

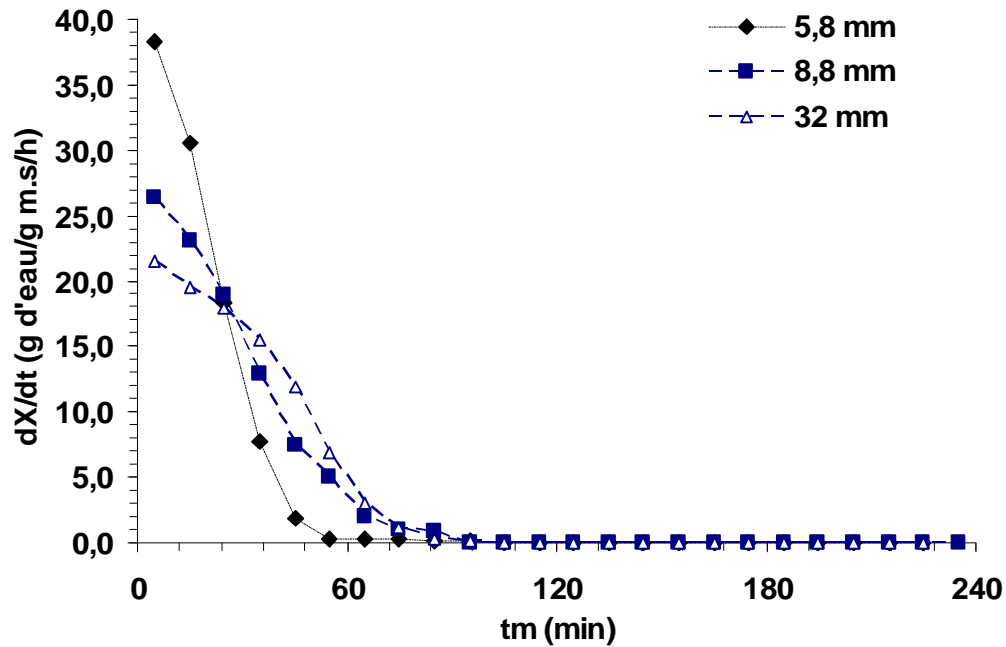
Le temps mis à atteindre le point d'inflexion est plus court (55 min) avec 5,8 mm pour une quantité d'eau évaporée (0,93 g/g b.s soit 48,19 % b.h) moins élevée que celles des épaisseurs de 8,8 et 32,0 mm qui assurent un temps de 65 et 75 min et ΔX_m plus important (1,33 et 2,88 g/g b.s soit 57,08 et 74,23 % b.h).

Le temps de séchage le plus court est assuré par la découpe 32,0 mm pour une évaporation supérieure à celle de 8,8 mm et de 5,8 mm.

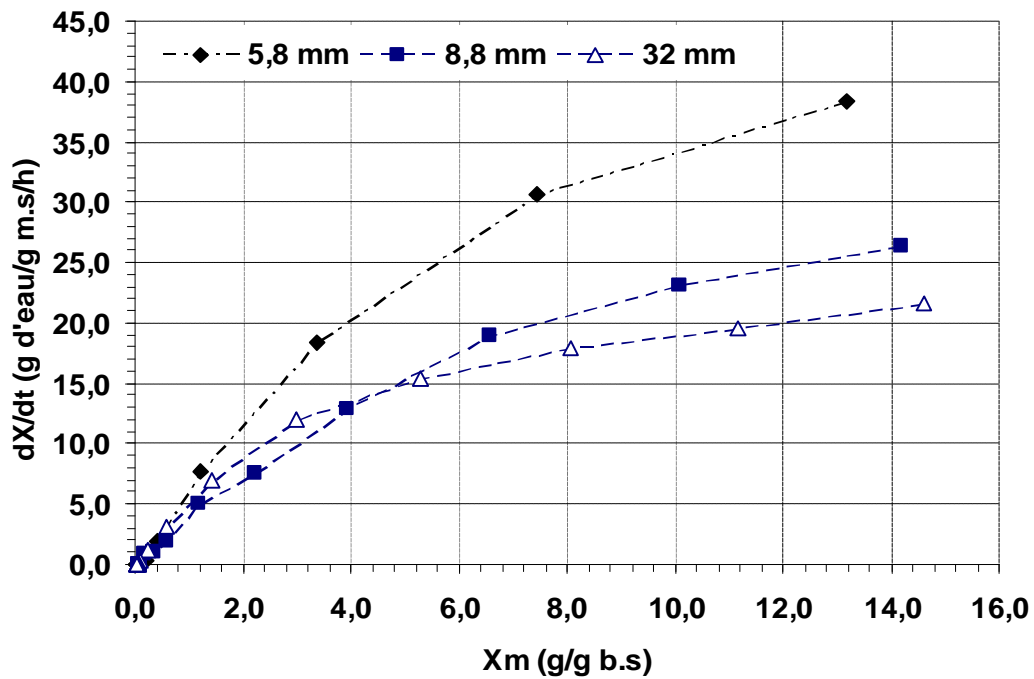
La difficulté d'extraire la quantité d'eau restante après le point de changement de pente est apparente chez la tranche de 8,8 mm que chez les deux autres. En 3h 10 min il est évaporée 1,28 g/g b.s (56,14 % b.h) avec 8,8 mm à comparer avec celle de 5,8 mm qui assure une évaporation de 0,90 g/g b.s (47,37 % b.h) en 3h et celle de 32,0 mm assure une élimination de 2,81 g/g b.s (73,75 % b.h) en 2h 40 min seulement. Les temps respectifs de cette évaporation représentent la part la plus importante (79,2 ; 77,2 et 68,1 % pour 5,8 ; 8,8 et 32,0 mm) de la durée totale du séchage jusqu'à X_{mf} .

►► l'effet de la taille de découpe sur les cinétiques et vitesses de séchage des tranches de cardon séchées à 85 °C , est représenté par la figure 37 (b et c) . Celle-ci montre un effet important où les courbes des trois tailles de découpe évoluent distinctement l'une de l'autre avec des vitesses initiales différentes de 38,35 ; 26,35 et 21,55 g/g m.s/h correspondant à des teneurs en eau initiales ($t_{mi} = 5$ min) de 13,20 ; 14,20 et 14,60 g/g b.s (92,96 ; 93,42 et 93,59 % b.h).

Il ressort que la vitesse la plus élevée est assurée par l'épaisseur la plus fine (5,8 mm) suivie par celle de 8,8 mm et la plus faible est assurée par la tranche 32,0 mm. L' effet est nettement apparent jusqu'après 25 min où la courbe de 32 mm se croise avec celle de 8,8 mm et assure des vitesses de séchage plus élevée que celle-ci jusqu'en fin de séchage à une teneur voisine



b : Vitesse de séchage de tranches de cardon à 85 °C ;
 $-dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de tranches de cardon à 85 °C ;
 $-dX/dt = f(X_m)$

Figure 37 : Effet de la taille de découpe sur la vitesse de séchage de tranches de cardon séchées à 85 °C : (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

de 0.6 g/g b.s où les trois courbes se confondent avec diminution probable de l'effet de la taille de découpe.

La durée de séchage suffisante pour atteindre X_{m1} et X_{mf} est à peu près la même pour les trois tranches avec 3h 45 min (225 min) pour 5,8 et 32,0 mm et 3h 55 min (235 min) pour la tranche de 8,8 mm qui est plus longue de 10 min.

Le temps mis à atteindre le point d'inflexion est plus court (35 min) avec 5,8 mm pour une quantité d'eau évaporée (1,21 g/g b.s soit 54,75 % b.h) plus élevée que celles de 8,8 mm qui assure un temps de 55 min ΔX_m moins important avec 1,18 g/g b.s soit 54,13 et celle de 32,0 mm assure un temps plus court 45 min avec ΔX_m le plus important des trois qui est de 3,00g/g b.s soit 75,00% b.h). Le temps de séchage des trois tranches étant proche la découpe 32,0 mm assure une évaporation d'une quantité d'eau supérieure à celle de 5,8 et de 8,8 mm.

La difficulté d'extraire la quantité d'eau restante après le point de changement de pente est apparente chez la tranche de 5,8 mm que chez les deux autres

. En 3h 10 min il est évaporée 1,18 g/g b.s (54,13 % b.h) avec 5,8 mm à comparer avec celle de 8,8 mm qui assure une évaporation de 1,11 g/g b.s (52,61 % b.h) en 3h et celle de 32,0 mm assure une élimination de 2,95 g/g b.s (74,68 % b.h) en 3h. Les temps respectifs de cette évaporation représentent (84,4 ; 76,6 et 80,0 % pour 5,8 ; 8,8 et 32,0 mm) la part la plus importante de la durée totale du séchage jusqu'à X_{mf} .

4-1-3- Discussion et conclusion

Les courbes de cinétique de séchage de tranches de cardon coupée en trois épaisseurs et longueur (5,8 ; 8,8 et 32,0 mm), séchées à trois températures (60 ; 70 et 85°C), montrent l'absence de phase de séchage constante. L'évolution du séchage s'effectue en phase à allure de séchage décroissante, qui peut être divisée en deux sous phases selon la température et la taille des tranches.

La durée de séchage des tranches de 5.8 mm aux trois températures est assez courte et celles séchées à 85 °C assurent le temps le plus court des trois températures avec celle de 32,0 mm suivie par celles de 8,8 mm.

Les vitesses de séchage les plus élevées sont assurées par la petite épaisseur par rapport aux autres tailles de découpe aux trois températures. La meilleure vitesse est assurée à 85 °C pour les trois tailles de découpe. La vitesse de séchage de départ représentée par les différentes courbes est très élevée avec 38,35 g/g m.s/h assurée par l'épaisseur 5,8 mm à 85 °C, celle de 32,0 mm à 70 °C assure la plus faible des vitesses, inférieure à 15 g/g m.s/h.

L'effet de la température est plus important lors du séchage de l'épaisseur de 8,8 mm que des deux autres découpe. Cependant à 85 °C, l'effet est prépondérant pour les trois découpes où il est montré une vitesse de séchage largement supérieure aux deux autres. Dans les deux autres cas de séchage des tranches de 5,8 et 32,0 mm les courbes de 60 et 70 °C se chevauchent minimisant l'effet de la température.

Le processus ne présentant que des périodes de séchage à régime décroissant ; l'ensemble des courbes de séchage, séchant à deux vitesses (ou sous phases) de décroissance, avec une première sous phase rapide relative au départ de l'eau faiblement liée. Une deuxième sous phase ralentie, jusqu'à la fin du séchage relative au départ de l'eau de plus en plus liée.

L'effet de la température paraît plus intéressant sur les cinétiques et vitesses de séchage lors de la première sous phase où la quantité d'eau évaporée correspondant à l'eau moins liée est assurée par la température la plus élevée et la plus fine des épaisseurs. Lors de la deuxième phase de décroissance, il est mis en évidence la durée plus longue qui correspond à l'eau plus difficile à évaporer avec une proportion du temps élevée comprise entre 68 et 84,5 % par rapport à la durée totale du séchage; pour une évaporation d'une quantité moins importante que celle du début de séchage.

L'effet de la taille de découpe est mieux exprimé lors du séchage à 70 °C et 85 °C que dans celle de 60°C. Il est tout aussi significatif que celui de la température.

L'influence de l'épaisseur des tranches de carton sur la cinétique de séchage est très importante, ce qui est montré sur les figures 35 à 37 où les courbes de cinétique et de vitesse des trois épaisseurs séchées avec la même température évoluent de manière distincte. La plus fine séchant plus rapidement que celle des deux autres.

Cependant la taille de découpe est probablement limitée à un seuil où l'effet de la température (transfert de chaleur) permettant l'évaporation et le départ de l'eau (transfert de masse) seraient limitée par la grandeur du produit. Ceci montre l'importance et l'intérêt de la

découpe dans les cinétiques de séchage pour les cas observés lors du séchage à 60 et 85 °C (chevauchement des courbes de 8,8 et 32,0 mm).

L'importance de l'effet de la taille de découpe associé à celui de la température de l'air de séchage a montré pour la majorité des courbes qu'ils sont significativement importants.

4-1-4-Activité de l'eau du cardon séché

La mesure de l'activité de l'eau (a_w) du cardon a été approchée pour déterminer le niveau de disponibilité de l'eau dans les tranches séchées afin de situer sa durée éventuelle de conservation après séchage.

Les tranches mélangées pour préparation de la prise d'essai ont été séchées et conditionnées dans des sachets cellophane thermo soudés entre trois mois et trois mois et demi au jour de leur utilisation.

Le mélange est obtenu à partir des tranches de 5,8 et 8,8 mm séchées à 60 °C ; de 8,8 mm séchée à 70 °C ; et des tranches de 5,8 et de 32,0 mm à 85 °C. La teneur en eau moyenne est de $0,066 \pm 0,01$ g/g b.s soit 6,2 % sur base humide.

La température moyenne au cours des cinq jours de la mesure de l' a_w du cardon est de $22,3 \pm 1,6$ °C.

Tableau 20 : Moyenne de la masse initiale et de la variation de masse des 3 essais :

Concentration d'H ₂ SO ₄ % (v/v)	36	46	64	88	mi moyen (g)
HRE % à 25°C	64,57	43,82	10,89	0,082	
mi moyen (g)	0,79±0,03	0,76±0,01	0,80±0,05	0,76±0,04	0 78± 0,03
$\Delta m = (m_i - m_f / m_i) \%$	0,0231	0,0465	0,0575	0,0656	

La figure 38 montre le tracé des variations de la masse en fonction des humidité relative d'équilibre en pourcent correspondant à l'activité de l'eau .La valeur de l' a_w du cardon séché est de $0,066 \pm 0,01$ obtenue entre 48 à 94 h de mise en équilibre.

La valeur obtenue permet de conserver le produit à une durée d'une année à température ambiante et à l'abri de la lumière et rayons du soleil. Afin d'éviter une éventuelle altération de

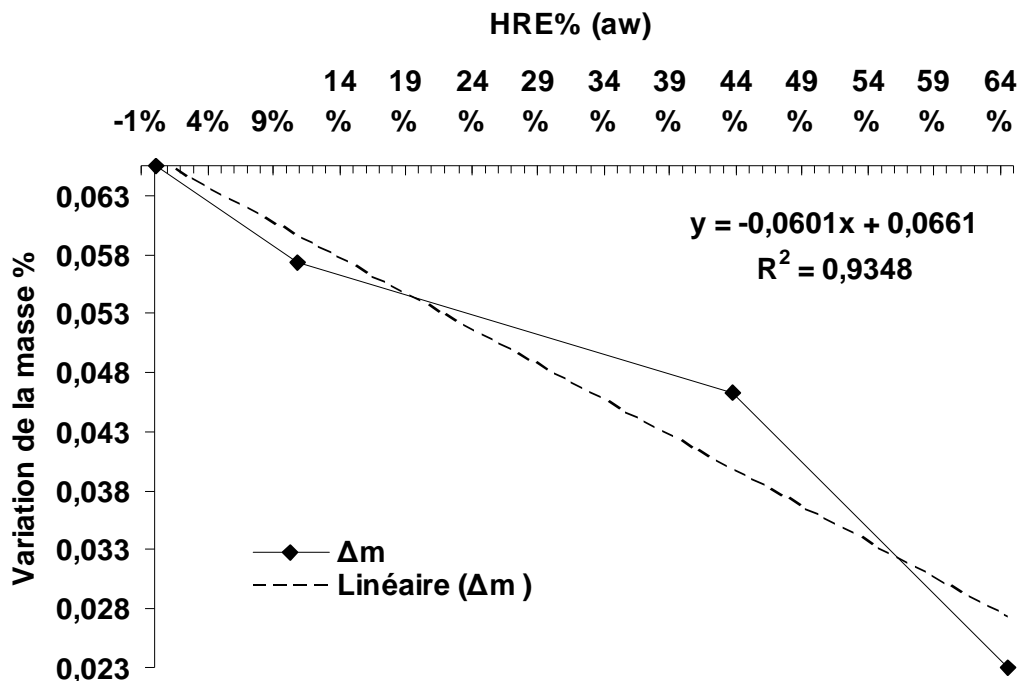


Figure 38 : Mesure de l'activité de l'eau du carbon séché

couleur et d'aspect qui peut être provoqué par des réactions d'oxydations qui sont élevées à des valeurs d'aw < 0,1-0,2, un emballage adéquat, imperméable et étanche est recommandé.

4-2-Evolution de la qualité du carbon au cours du séchage

4-2-1-Rétrécissement et déformation

Étant donné la forme spécifique des côtes de carbon, il faut suivre les trois dimensions (épaisseur de découpe, hauteur et largeur des côtes), le nombre de tranches mises à sécher. Il était difficile de faire toutes les mesures des tranches au pied à coulisse vu leur comportement au cours du séchage avec les déformations que subi le produit (voir photos du chapitre 4-2-2).

Le suivi du rétrécissement des tranches de carbon n'a été effectué que pour un essai de tranches de 5,8 mm séchées à 70 °C (figure 39).

L'évolution du rétrécissement de ces tranches montre que l'on atteint un taux de rétrécissement de 49,7 % par rapport à l'épaisseur initiale à 3 h temps de séchage correspondant à la teneur en eau de 0,045 g/g b.s (4,31 % b.h) .

Cependant ,cette diminution de la taille peut être représentée par le taux de rétraction qui est obtenu par la différence [$(\text{épi}-\text{épf})/\text{épi} \times 100$] qui représente la partie perdue du légume au cours du séchage qui est de 50,3 %.

Les mesures de la hauteur et la largeur des côtes ont donné des taux de rétrécissement par rapport à l'état initial de 36,6 % et 32,1% à 3h30min (210min) et à $X=0,045$ g/g b.s montrant ainsi la diminution de la taille dans ses trois dimensions en accord avec ce qui est rapporté par la littérature.

Nous constatons que l'évolution du rétrécissement suit la même évolution que la teneur en eau dans le temps. Au fur et à mesure que le légume perd de l'eau, le légume rétrécit et se déforme après aplatissement et écrasement des cellules .Cette conséquence est due au vide laissé (création de porosité) par l'eau lors de son départ par évaporation.

Selon BIMBENET et coll. (2002 b), l'évolution de la structure physique du matériau est directement liée au mode d'évaporation et de transport interne d'eau. La création de porosité est provoquée par une évaporation interne suivie par la migration de l'eau

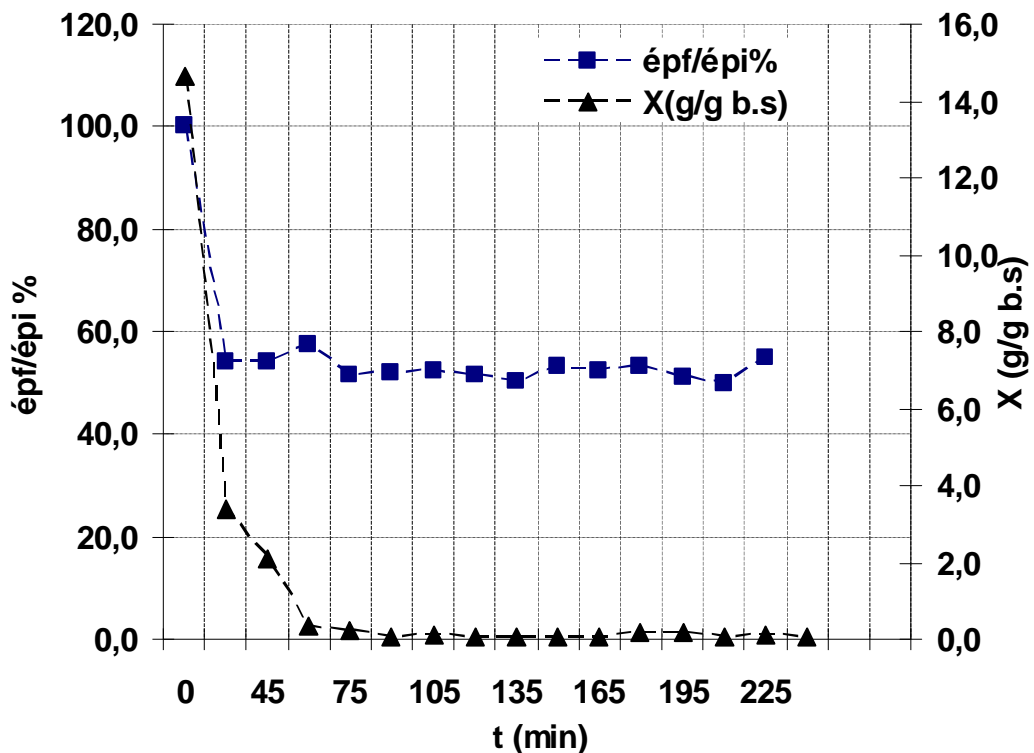


Figure 39 : Evolution du rétrécissement des tranches de cardon de 5,8 mm d'épaisseur séchées à 70 °C

sous forme vapeur. Lorsque le transport d'eau a lieu sous forme liquide vers la surface, le produit a tendance à rétrécir proportionnellement au volume d'eau évaporée. Ceci corrobore les observations sur la figure 39 de l'évolution du rétrécissement de façon proportionnelle à la diminution de la teneur en eau.

4-2-2- Changement de la couleur

Les tranches de cardon suivies au cours du séchage aux trois températures et tailles de découpe sont présentées en figure 40.

Les observations réalisées au cours du séchage des tranches de cardon à différentes températures et taille de découpe montrent dans tout les cas de figure un rétrécissement suivi par une déformation des morceaux. Les tranches longues (32,0 mm) se déforment par une torsion et se recroquevillent sur elles mêmes.

L'aplatissement apparaît sur l'ensemble des tranches qui au-delà d'une certaine teneur en eau (environ 80% sur base humide).

Le brunissement n'apparaît que sur les tranches de 32,0 mm après une longue durée d'exposition à l'air de 85°C, mais il reste léger (figure 40 c).

La couleur ne change pas pour l'ensemble des morceaux séchés aux différentes températures.

Le séchage des végétaux à l'air chaud résulte par un rétrécissement considérable et formation d'une structure dense selon NINDO et *al.* (2003).

NINDO et *al.* (2003), dans leur étude du séchage de l'asperge en vue d'évaluer la qualité physique du légumes dans la rétention des propriétés antioxydantes, rapportent l'importance des propriétés physiques du produit et le régime temps –température utilisé durant le séchage des végétaux verts.



à t_0 tranches de 32,0 mm



8,8 mm



5,8mm



t 1h ; X=4,523



X=3,82 g/gb.s



X=2,275 g/g b.s



2h ; X=1,621



t 3h ; X=0,30g/g b.s



X=0,062g/gb.s



temps 3h X=0,187



t 4h Xm=0,143g/g b.s



X=0,104g/g b.s

a : Séchage à 60 °C, épi 5,8mm, 8,8mm ; 32,0mm



Après 1h; X=4,18 g/g b.s



X=1,6 g/g b.s



X=0,46 g/gb.s



At2h; X=0,94 g/g b.s



Xm= 0,16 g/g b.s



X=0,08 g/g b.s



t 3h; X= 0,12 g/g b.s

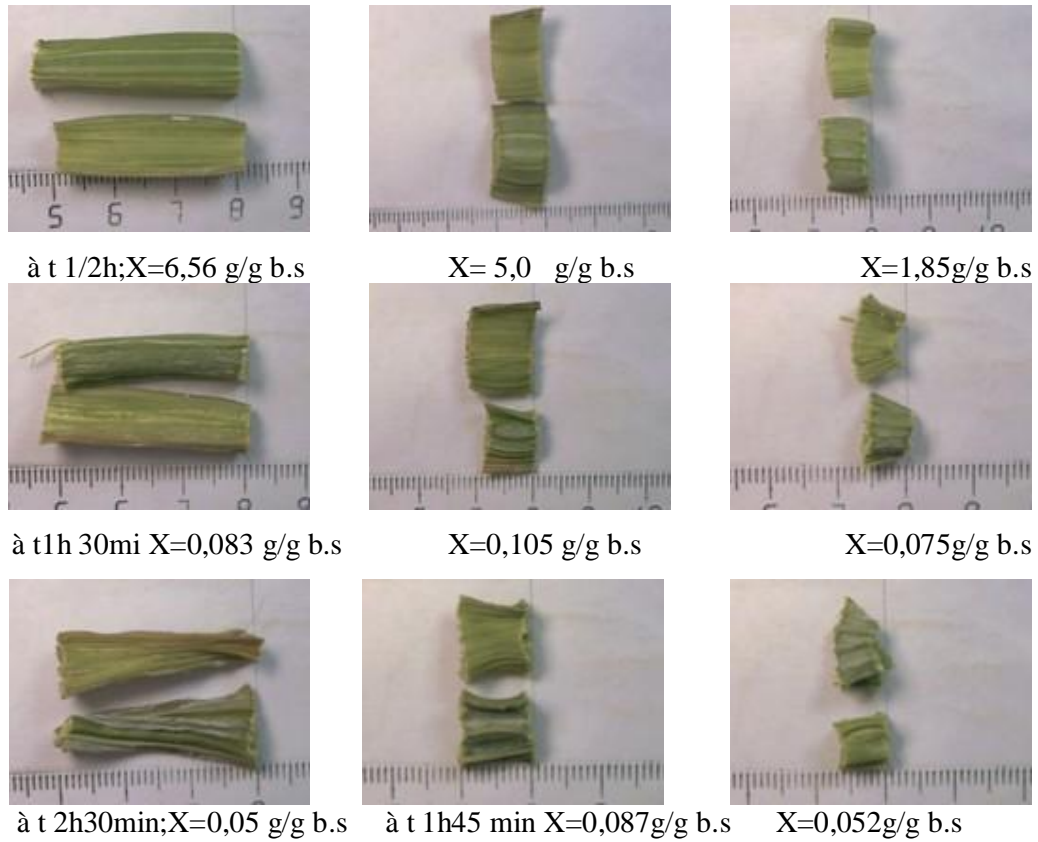


2h 45min ; Xm= 0,079



Xm=0,047 g/g b.s

b : Séchage à 70°C, épi 5,8mm, 8,8mm ; 32,0mm

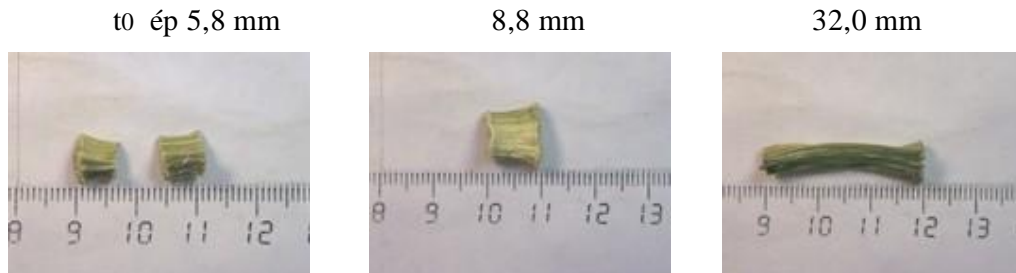


c : Séchage à 85 °C, épi 5,8mm; 8,8mm ; 32,0mm

Figure 40 : Prises de vue du suivi du changement de forme et de couleur des tranches de cardon (5.8 : 8.8 et 32.0 mm) séchées à (a) 60 °C :(b) 70 °C et (c) 85 °C.

4-3- Réhydratation du légume séché

La figure 41 rassemble les prises de vues de l'évolution des tranches de cardon au cours du temps en fonction de chaque épaisseur de découpe.



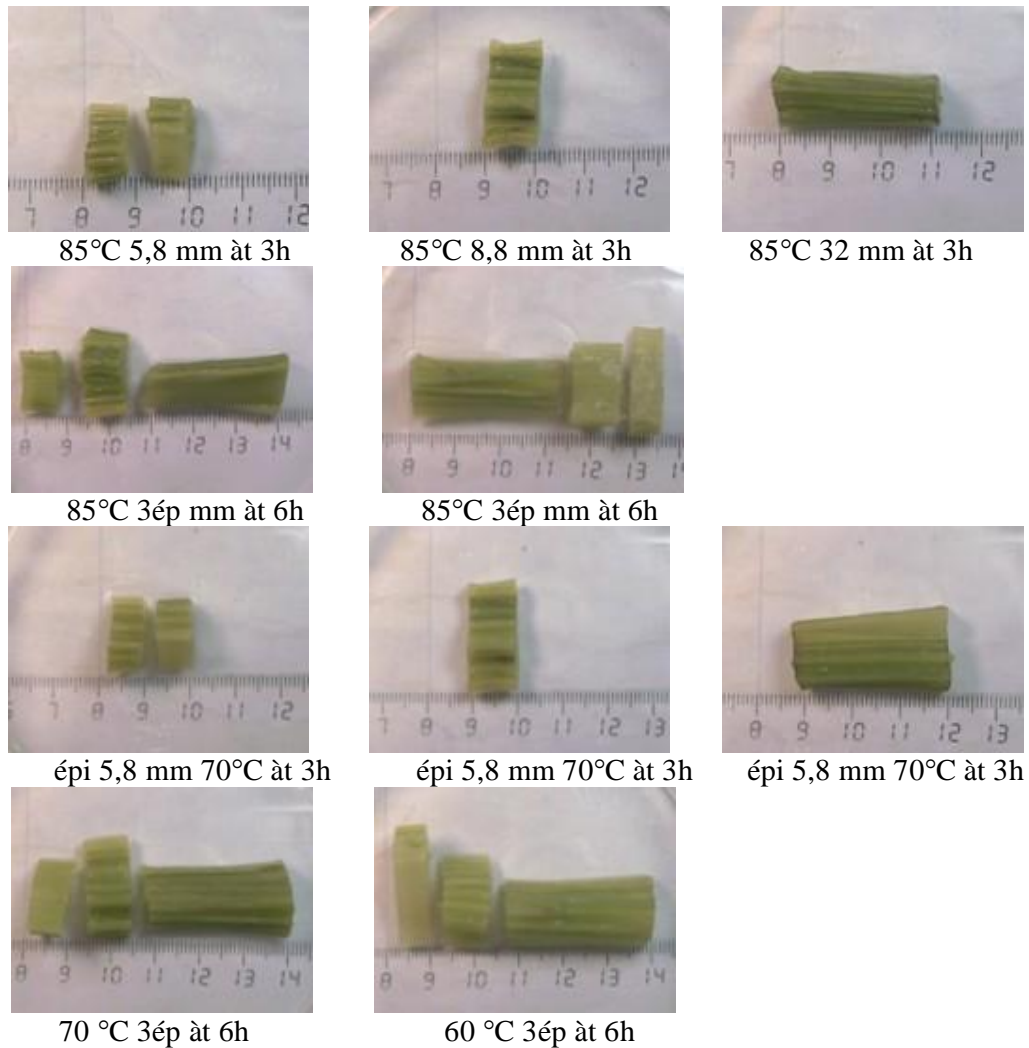


Figure 41 : Prises de vue du suivi de la réhydratation, reprise de forme et de couleur des tranches de cardon (5.8 : 8.8 et 32.0 mm) séchées à 60 : 70 et 85 °C.

4-3-1- Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation du cardon

L'évolution de l'absorption d'eau des tranches de cardon à partir de laquelle les teneurs en eau sont tirées pour, exprimer la réhydratation du légume séché en taux de réhydratation par rapport à la teneur en eau initiale ; $X_i = 14,63$ g d'eau/g de m.s soit $x_i = 93,6$ % b.h pour celles séchées à 60 et 70 °C, et 16,39 g/g b.s soit 94,25 % b.h pour le séchage à 85°C, calculé à partir des teneurs en eau qui évoluent dans le temps, permet de tracer les courbes d'évolution de la réhydratation du légume. Les teneurs en eau et épaisseur

finales des tranches après séchage et après réhydratation (X_{fsec} , $X_{réh}$, épf séc, épf réh), avec leur taux de réhydratation final, sont résumés dans le tableau 21.

Tableau 21 : Taux de Réhydratation (TR) du cardon (à $26\pm 2^\circ\text{C}$) en fonction de la température de séchage et de la taille de découpe.

T° de séchage	épi de découpe (mm)	temps de séchage (min)	moy.de tranches sèches (g)	X_i b.s / X_i b.h	épf réhyd (mm)	X_f séché (g/g)	$X_{réh}$ (g/g)	TR= $X_{réh}/X_i*100$ (%)
60°C	5,8±0,6	180	0,12±0,012	14.63/ 93,6%	7,0	0,066	10,67	72,9±2,8
	8,8±0,6	360	0,34±0,07		9,0	0,094	10,08	68,9±6,6
	32,0±1,2	420	0,66±0,01		-	0,053	11,40	77,9±10,8
70°C	5,8±0,6	270	0,36±0,03		-	0,049	12,39	84,7±5,2
	8,8±0,6	290	0,87±0,06		9,0	0,098	12,92	88,3±12,6
	32,0±1,2	240	1,18±0,20		-	0,136	15,88	108,6±4,9
85°C	5,8±0,6	230	0,06±0,001	16.39/ 94,25%	7,0	0,042	18,33	111,8±15,5
	8,8±0,6	240	0,12±0,007		9,0	0,063	18,28	111,6±6,9
	32,0±1,2	230	0,28±0,013		30,0	0,045	8,82	53,8±2,5

L'eau de réhydratation est restée sans changement, le cardon n'ayant pas subi de brunissement au cours du séchage et visiblement il n'y a pas eu de diffusion de substances dissoutes colorant l'eau.

D'après les résultats du tableau 21, l'ensemble des tranches de cardon séchées assurent un taux de réhydratation compris entre 53 et 112%. Ceci montre que le légume possède une capacité de réhydratation assez importante avec reprise de la taille initiale avant séchage. Dans le cas des tranches de 5,8 et 8,8 mm, la mesure de l'épaisseur après réhydratation s'est révélée être supérieure à l'épaisseur de découpe.

La déformation et la torsion des tranches ont disparues avec une reprise de la forme initiale. La reprise de la couleur originelle du produit d'un vert foncé est montrée par les prises de vue (figure 41).

D'après les courbes de réhydratation de la figure 42, l'effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation est apparent. L'évolution de l'absorption d'eau des tranches se fait de manières distinctes où chaque température révèle une allure différente de l'autre.

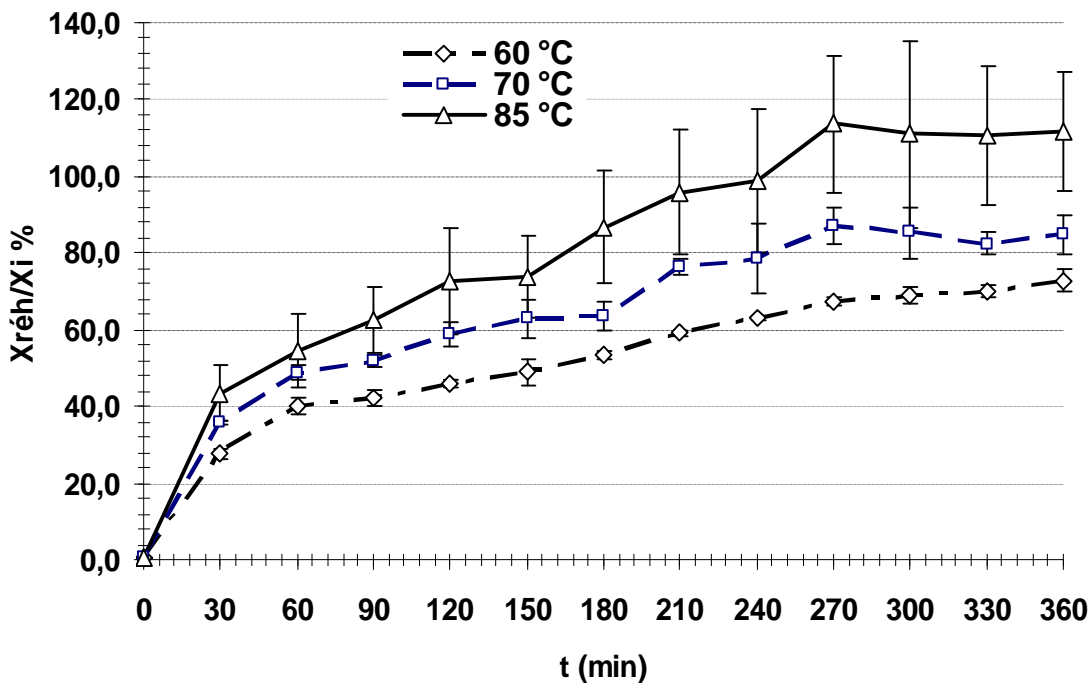
- L'évolution de l'absorption des tranches de 5,8 mm (figure 42 a), montre des taux de réhydratation qui augmentent avec la température où celle de 85°C assure le plus élevé avec 111,8 %, suivie par celle de 70 °C qui assure un taux de 84,7 % et le plus faible est donné par la température de 60 °C avec 72,9 %.

- L'évolution de l'absorption des tranches de 8,8 mm (figure 42 b), montre des taux de réhydratation qui augmentent avec la température où celle de 85°C assure le plus élevé avec 111,6 %, suivie par celle de 70 °C qui assure un taux de 88,3 % et le plus faible taux est donné par la température de 60 °C avec 68,9 %.

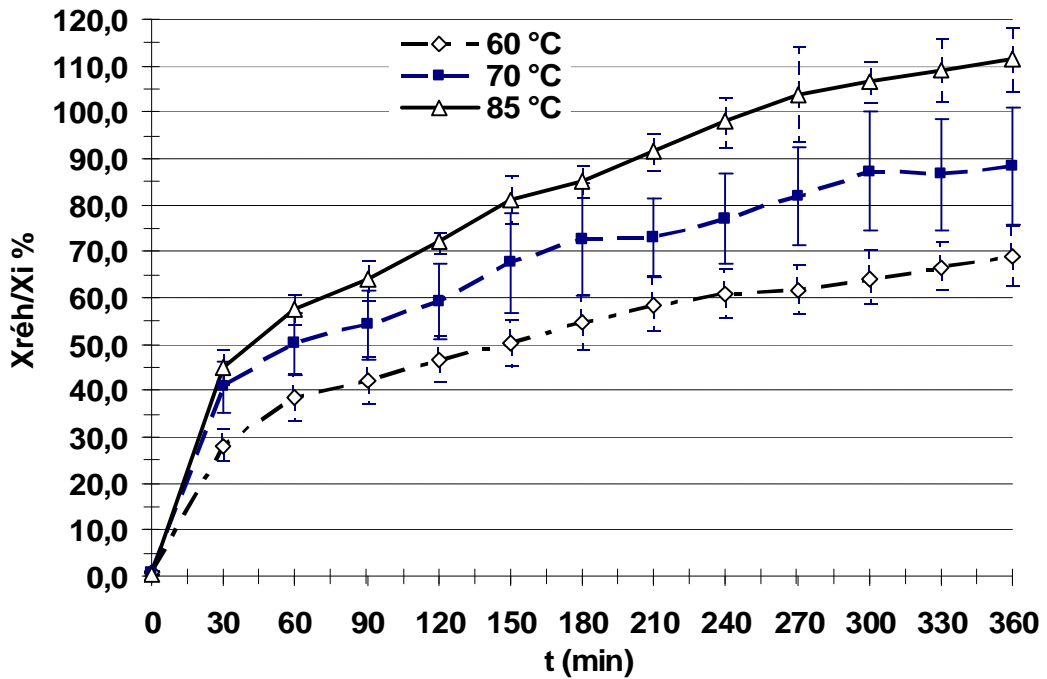
- L'évolution de l'absorption des tranches de 32,0 mm (figure 42 c), montre des taux de réhydratation différents de celles qui précèdent où celle de 70 °C qui assure le plus élevé avec 108,6 %, suivie par celle de 60 °C qui assure un taux de 77,9 % et le plus faible taux est donné par la température de 85 °C avec 53,8 %.

Dans le cas des tranches de 5,8 et 8,8 mm, les taux de réhydratation paraissent en accord avec ce qui est rapporté par la littérature où les produits qui séchant rapidement se réhydratent le plus , montrant un effet important de la température sur la réhydratation.

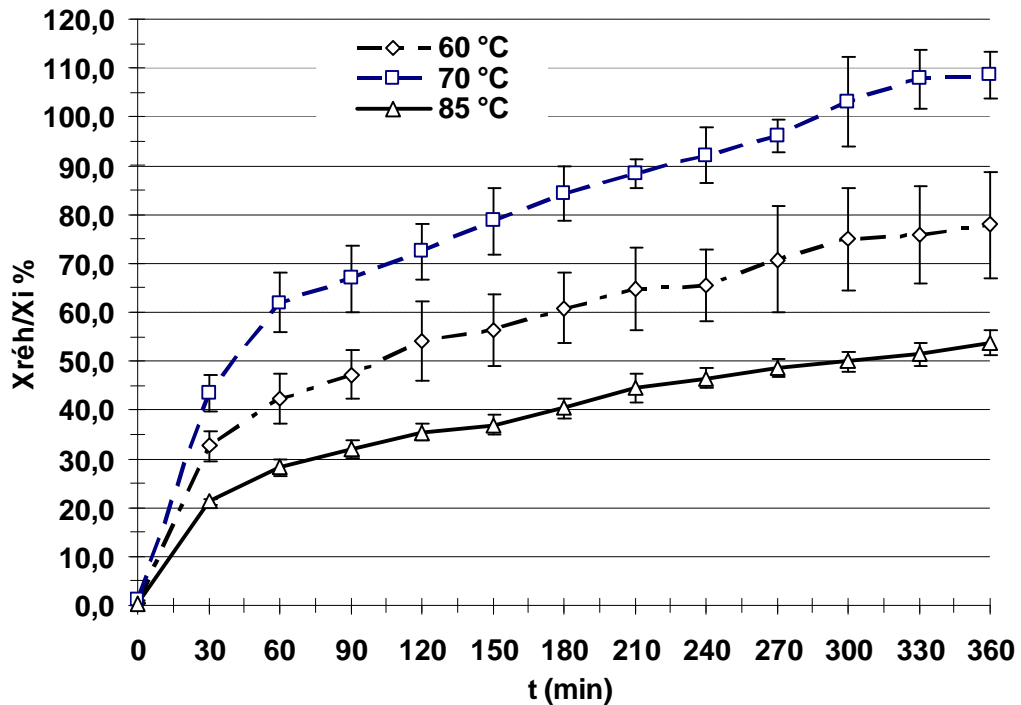
BIMBENET et coll. (2002b) rapportent qu'en séchage classique par air chaud, les plus rapide des séchages conduisent aux meilleures réhydratations et que, le taux de réhydratation est fortement lié à la dénaturation des protéines, qui est fonction des couples temps - températures atteints pendant le séchage .



a : Effet de la température sur la capacité de réhydratation des tranches de carton de 5,8 mm d'épaisseur



b : Effet de la température sur la capacité de réhydratation des tranches de carton de 8,8 mm d'épaisseur



c : Effet de la température sur la capacité de réhydratation des tranches de carton de 32 mm de longueur

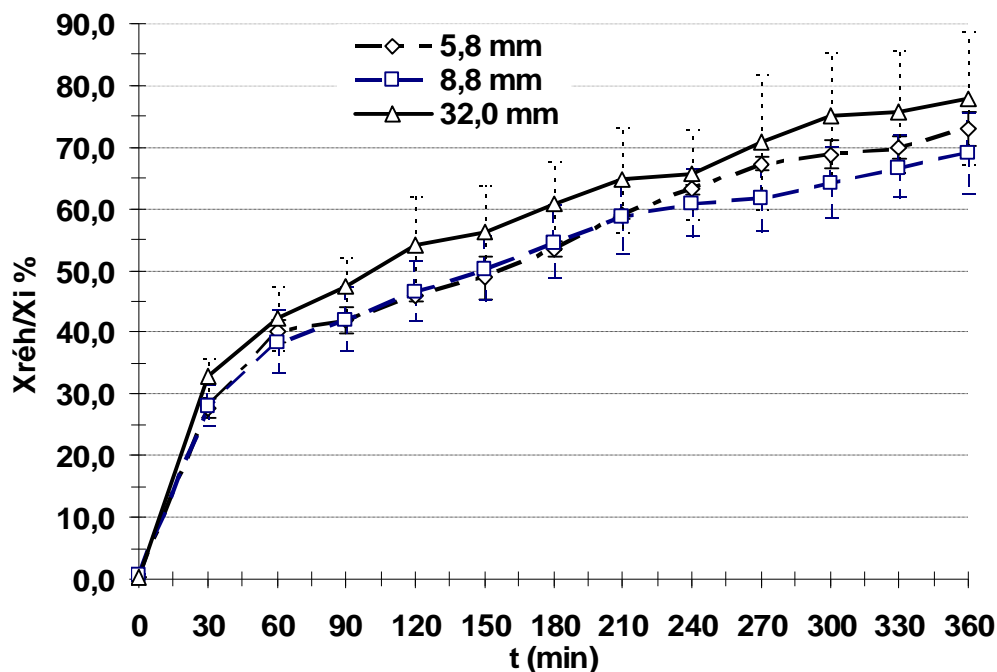
Figure 42 : Effet de la température de l'air sur la capacité de réhydratation de tranches de carton coupées en 5,8 mm (a) ; 8,8 mm (b) et 32,0 mm (c) de longueur et réhydratées dans de l'eau distillée à température ambiante

Vu les résultats de la cinétique de séchage où les tranches ont montrées des temps de séchage relativement court, moins de brunissement et de croûtage, ce qui laisse supposer que les protéines que contient le carbon (0,8 g/100g de partie comestible selon FAVIER et coll. (1995)) n'ont pas été dénaturées. Mais l'écrasement et le rétrécissement ont probablement joué un rôle limitant la capacité de réhydratation des tranches de 32,0 mm séchées à 85 °C qui ont le plus faible des taux de réhydratation.

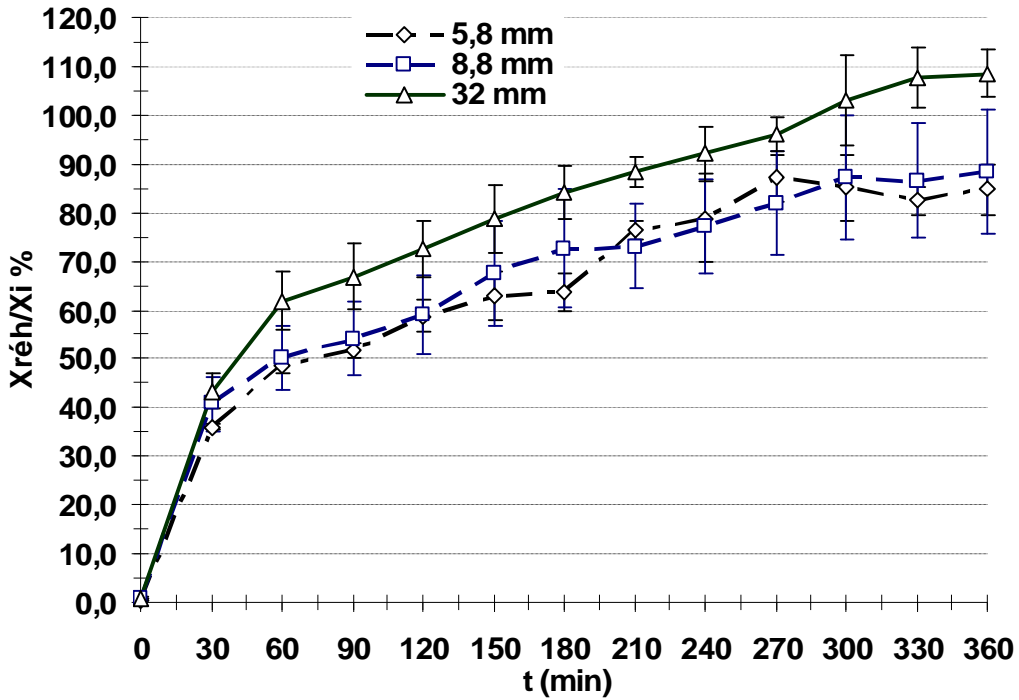
4-3-2- Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation

Les courbes présentées dans la figure 43 montrent un effet de la découpe moins important où les différences entre les trois tailles de découpe séchées à une même température ne sont pas conséquents.

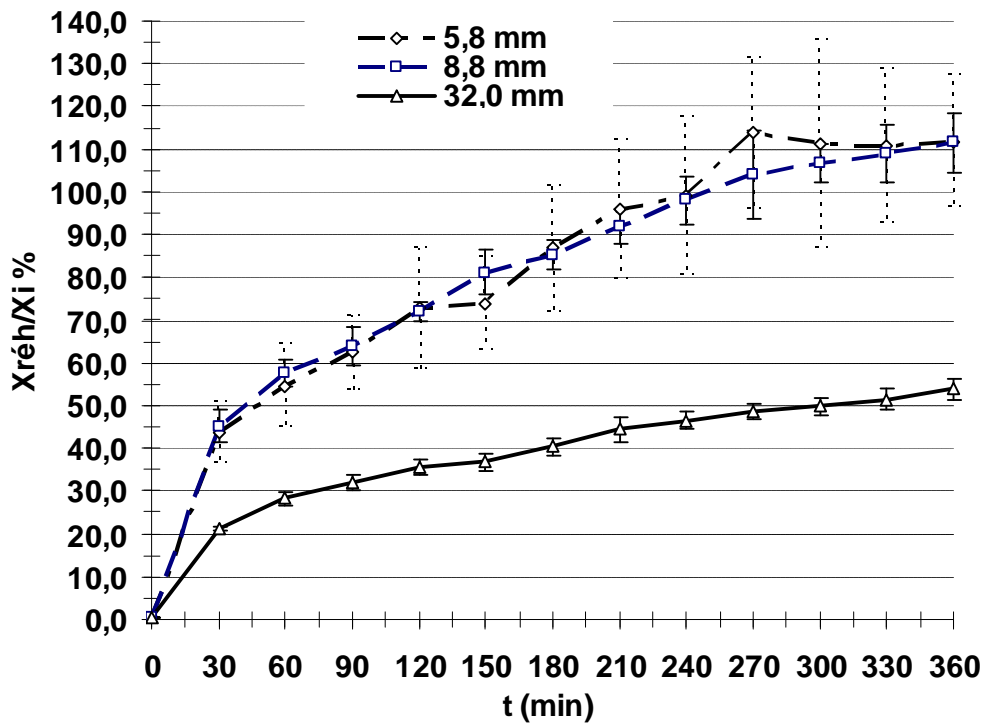
-Les courbes de la figure 43 a des trois tailles séchées à 60 °C, montrent que seule la tranche de 32,0 mm qui assure un taux de réhydratation plus élevée qui est de 77,9 % ,suivie par la tranche de 5,8 mm qui assure un taux de 72,9 % . La tranche de 8,8 mm assure le taux le plus faible avec 68,9 %.



a : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation des tranches de carbon séchées à 60 °C



b : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de tranches de carbon séchées à 70 °C



c : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation des tranches de carbon séchées à 85 °C

Figure 43 : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de tranches de carbon séchées à 60 °C (a);70 °C (b) et 85 °C (c) et réhydratées dans de l'eau distillée à température ambiante

Les courbes de la figure 43 b des trois tailles séchées à 70 °C, montrent que la tranche de 32,0 mm assure le taux de réhydratation le plus élevée avec 108,6 % ,suivie par la tranche de 8,8 mm qui assure un taux de 88,3 % . La tranche de 5,8 mm assure le taux le plus faible avec 84,7 %.

-Les courbes de la figure 43 c des tranches séchées à 85 °C, montrent des taux de réhydratation inversement proportionnel à la taille de découpe. La tranche de 32,0 mm assure le taux de réhydratation le plus faible avec 53,8 %, suivie par la tranche de 8,8 mm qui assure un taux de 111,6 %. La tranche de 5,8 mm assure le taux le plus élevé avec 111,8 %.

Le séchage par l'air chaud à une vitesse de séchage initiale rapide peut causer des cas de durcissement (croûtage) du produit en surface résultant par une perte de l'aptitude (capacité) à une complète reconstitution selon NINDO et *al.* (2003). Ces allégations sont valables probablement pour le cas de la tranche de 32,0 mm qui a perdu sa capacité de réhydratation due aux changements subi par le produit lors du séchage étant donné sa taille.

Cependant le paramètre taille de découpe étant un facteur influent lors des opérations de séchage où les transferts de chaleur et de masse sont plus rapides lorsque les morceaux à sécher sont de petite taille.

Dans le cas des tranches de 5,8 et 8,8 mm qui ont assuré des vitesses de séchage initiales très élevées, une durée de séchage assez courte de 1h 35 min (95 min) pour atteindre la teneur en eau $X_m < 10\%$ b.s ,elles n'ont pas perdues leur capacité de réhydratation . Au contraire elles ont assuré des taux de réhydratation supérieurs à 100 %.

Dans le cas de la réhydratation du caron nous observons les mêmes phénomènes cités par SAGUY et *al.* (2004) lors du séchage de la carotte, à savoir, l'allure asymptotique. En divisant les courbes d'évolution en deux sous phases, nous constatons qu'en début de réhydratation la vitesse d'absorption d'eau est rapide (les premières 30 min) et en progression continue. Le changement de l'allure de la pente est observé à partir de 60 min (1h) où, la vitesse de réhydratation ralentie. Nous pouvons alors assimiler ce comportement à une absorption capillaire en début et la deuxième sous phase à une diffusion progressive lente aboutissant au gonflement du produit avec une quasi-récupération de la forme et la taille initiales du légume.

La récupération de la forme et de l'épaisseur des tranches est probablement due à la richesse du produit en amidon et fibres (0,3 et 2,0 g/100g de partie comestible selon FAVIER et coll. (1995)) qui participent activement au gonflement du tissu du cardon.

COLAS (2003), rapporte que diverses modifications subies par les protéines de la membrane et par les substances pectiques de la paroi de la lamelle moyenne. A l'opposé, en raison des structures très ordonnées de la cellulose et la lignine, les tissus à paroi secondaire et les tissus lignifiés subissent peu de ramollissement, ceci est probablement valable pour le cas des tranches longues dont les modifications ont été importantes lors du séchage à température élevée qui n'ont pas donné des taux de réhydratation conséquents.

Ce phénomène est probablement dû au fait du durcissement de la surface des tranches du légume qui ne permet pas à l'évaporation de l'eau de se faire aussi rapidement que les débuts du séchage. L'aplatissement et la torsion des tranches sont un autre facteur limitant que l'on peut rajouter au ralentissement du processus.

Conclusion:

Nous n'avons pas trouvé des données dans la littérature à propos du séchage du cardon, étant un légume qui se consomme pour sa richesse en eau, éléments minéraux ainsi que ses fibres, à l'état frais. Cependant comme il fait partie des légumes tiges nous l'avons assimilé à d'autres légumes de même nature pour tenter d'apporter une éventuelle explication à son comportement au cours du séchage.

Les résultats auxquels nous sommes parvenus sont confortés par KROKIDA, MAROULIS, TSAMI & MARINO-KOURIS (1997) cités par KROKIDA et *al.* (2003) qui rapportent que le séchage par air conventionnel étant le plus fréquemment utilisé dans les opérations de déshydratation dans les industries alimentaires; la cinétique de séchage est influencée de façon importante par la température de l'air et les caractéristiques de dimension du produit,

Le séchage du cardon montre que l'effet de l'épaisseur ainsi que celui de la température de séchage, sur l'altération du produit et le temps de séjour de ce dernier, sont des facteurs déterminants sur la cinétique, la vitesse de séchage et également sur le rétrécissement et l'aptitude du produit à se réhydrater.

L'effet de la température est plus important sur les tranches de 8,8 mm séchées aux trois températures.

Celui de la taille de découpe est plus significatif à 70 °C lors du séchage sur les trois tranches.

NINDO *et al.* (2003), rapportent que la reconstitution du produit montre que les asperges ont une même luminance de couleur que les fraîches. Le cardon est un légume tige comme les asperges, qui après réhydratation a donné une luminance de peau et une reprise de la couleur vert foncé initiale à l'état frais.

L'échantillon plus épais utilise plus d'énergie que celui qui est mince, ceci reflète la faible capacité de réhydratation et un temps plus lent pour sécher les échantillons plus épais. De même pour le rétrécissement (diminution de la dimension) qui conduit à une augmentation de l'énergie nécessaire pour le transfert de l'eau (WANG et XI, 2004). Ceci corrobore les effets observés sur les tranches de grande taille par leur éventuelle altération du tissu qui conduit à un faible taux de réhydratation.

Les résultats prometteurs obtenus avec les épaisseurs les plus minces (5,8 et 8,8 mm) séchées 85 °C dépassant les 100 % avec un gonflement du tissu et une épaisseur supérieure à celle de la découpe. Les mêmes résultats sont obtenus avec les tranches de 32,0 mm séchées à 70 °C.

Le temps pris pour la reconstitution des végétaux séchés et l'apparence du végétal sont deux importants facteurs nécessitant une attention particulière en formulation et présentation, sélection et évaluation dans le procédé de séchage. La capacité ou l'aptitude des aliments à se reconstituer sous forme de particules (pièces ou morceaux) des végétaux en lamelles ou disques, dépend en premier lieu de la structure interne des pièces du produit séché et de l'étendue des composés de retenir l'eau telles que les protéines et amidon qui peuvent être endommagés au cours du séchage (BRENNAN, BUTTERS, COWELL et LILLY (1990) cités par NINDO *et al.* (2003).

Le but final de l'étude du cardon est d'utiliser les tranches séchées comme ingrédients dans les soupes instantanées dans les futurs procédés de préparation des produits nutritionnels. Les tranches de longueur peuvent être utilisées telles quelles dans des salades après réhydratation à la vapeur.

D'après les résultats obtenus des cinétiques de séchage du cardon et l'étude de son comportement au cours et après séchage, nous pouvons conclure qu'il existe une interrelation entre la température de l'air et l'épaisseur du produit et leur effets cumulés sur la durée et la vitesse de séchage, le rétrécissement et leurs conséquences sur la capacité de réhydratation du légume séché.

5- Séchage et comportement de la pomme de terre

5-1- Cinétique de séchage

5-1-1- Effet de la température sur la cinétique et la vitesse de séchage

Le résultat de l'effet de la température de séchage sur la cinétique des vitesses de séchage des rondelles de pomme de terre est exprimé par des courbes, montrant l'influence de ce paramètre sur le comportement de chaque rondelle en fonction de sa dimension. Les figures 44 a, 45a et 46 a de cinétique de séchage $X_m = f(t_m)$ sont présentées en annexe 1.

Les figures 44 (b et c), 45 (b et c) et 46 (b et c) représentent l'évolution de la cinétique $X_m = f(t_m)$ et de la vitesse de séchage $dX/dt = f(t_m)$ et $dX/dt = f(X_m)$ de la pomme de terre et montrent l'effet de chaque température de séchage (60 ; 70 et 85°C) sur chacune des trois épaisseurs de rondelles de pomme de terre (6,3±0,4; 8,9±0,3 et 12,9±0,3 mm).

L'allure générale des courbes de cinétique et des vitesses de séchage (figures 44,45 et 46) montre que le séchage se déroule en phase décroissante en l'absence de la période de mise en température et de la période à allure constante. Ce phénomène est rapporté en littérature à propos des produits alimentaires, notamment les légumes.

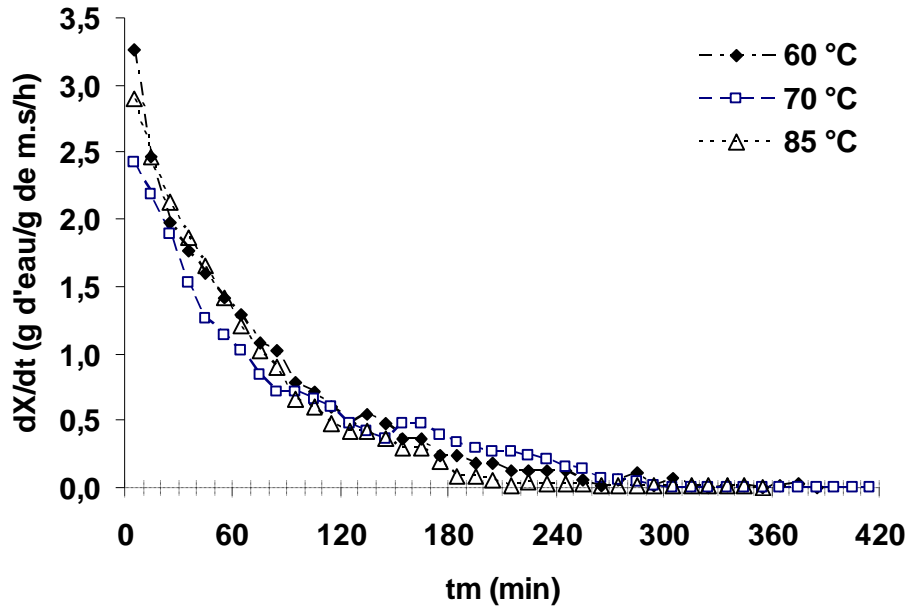
La présence d'une seule phase à allure décroissante montre qu'elle peut être subdivisée en deux ou trois sous périodes selon la température de l'air et l'épaisseur des rondelles.

►► Sur les figures 44 b et 44 c de l'épaisseur 6,3±0,4 mm, les courbes démarrent au temps initial ($t_{mi} = 5 \text{ min}$) avec des vitesses initiales $(-dX/dt)_i$ de séchage différentes où celle de 60 °C est la plus élevée avec 3,26 g d'eau/g m.s/ h correspondant à une teneur en eau initiale X_{mi} de 3,42 g/g b.s (77,37 % b.h), suivie par celle de 85 °C avec 2.90 g d'eau/g m.s/h et une X_{mi} de 3,11 g/g b.s (75,67 % b.h) et enfin la température 70 °C a la plus faible vitesse initiale de 2,42 g/g m.s/h correspondant à X_{mi} de 3,15 g/g b.s (75,9 % b.h).

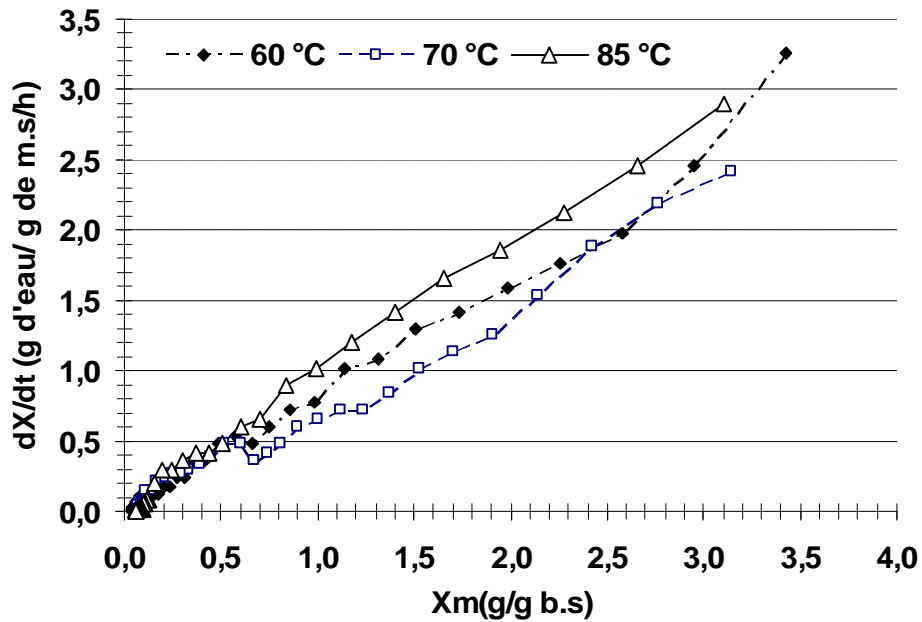
Au cours du séchage les trois courbes de 60 °C ; 70 °C et 85°C évoluent de façon séparée du début du séchage jusqu'aux basses teneurs en eau. Dans la figure 44 b, il apparaît que les courbes de 85 et 60°C se rapprochent au début du séchage à 35 min sans se confondre où l'effet de la température s'atténue quelque peu jusqu'à $t_m = 65 \text{ min}$ où l'effet de la température s'accroît. Cette partie montre que le séchage se déroule à des vitesses rapprochées, ensuite la décroissance devient plus rapide à 85 °C qu'à 60 °C .

Au contraire sur la figure 44 c, l'effet est diminué entre les courbes de 60 et 70 °C qui se rapprochent en début du séchage à des teneurs en eau de 2,2 et 1,9 g/g b.s puis l'effet devient important où celle de 70°C montre une vitesse de décroissance plus importante. Les trois

courbes évoluent



b : Vitesse de séchage de rondelles de Pomme de terre de 6,3 mm d'épaisseur; $dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de rondelles de Pomme de terre de 6,3 mm d'épaisseur; $dX/dt = f(X_m)$

Figure 44 : Effet de la température de l'air sur la vitesse de séchage de rondelles de pomme de terre de 6,3 mm d'épaisseur, (b)- $dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

séparément à des vitesses et teneurs en eau différentes montrant l'importance de l'effet de la température de l'air sur ces rondelles jusqu'aux basses teneurs en eau résiduelles à partir des environs de 0,6g/g b.s à la fin du séchage.

► Les courbes de séchage des températures de 60 et 70 °C montrent qu'à Δt 4h 25min (265 min), et 3h05min (215min) pour celle de 85 °C, les rondelles atteignent la teneur en eau moyenne sur base sèche <10 g/g b.s, $X_{m1}=0,099$; 0,091 et 0,099 g/g b.s (9,0; 8,34 et 9,0 % sur b.h) respectivement. Cette durée a été suffisante pour éliminer ΔX_{m1} de 3,323; 3,056 et 3,008 g d'eau /g de masse sèche soit 76,87; 75,34 et 75,04 % sur base humide de la totalité de l'eau contenue dans la pomme de terre.

La teneur en eau moyenne finale est atteinte après 2 h; 2h 30 min et 2h20 min (120 ; 150 et 140 min) de plus pour éliminer respectivement 6,2 ; 2,5 et 4,4 % b.s (5,84; 2,44 et 4,21% b.h) d'eau restante de X_{m1} jusqu'à X_{mf} de 0,037 ; 0,066 et 0,056 g/g b.s (3,57 ; 6,19 et 5,3 % b.h).

Le temps Δt de 6 h25; 6h 55 min et 5h 55 min (385; 415 et 355 min) correspond à l'évaporation de ΔX_{mt} 3,39; 3,081 et 3,05 g d'eau /g de m.s soit 77,22 ; 75,496 et 75,31 % b.h (g d'eau évaporée par 100 g de masse humide) au cours du séchage de ces rondelles de pomme de terre de 6,3 mm d'épaisseur.

Ce comportement de la courbe de 60 °C avec une vitesse plus élevée et une quantité d'eau évaporée plus que celle des deux autres températures est due à la teneur en eau de départ du produit qui est plus élevée 78,69 % sur base humide (3,693 g/g b.s) et de 77 % sur base humide (3,35 g/g b.s) pour celle de 70 et 85°C Ceci dit, l'effet de la température trouve son importance dans la durée de séchage respective qui est plus courte à 85 °C que pour les deux autres..

► Le changement de pente est observé (figure 44 b et 44 c) à 65min (60 °C) et à 85min (70 et 85 °C) de séchage, il correspond à X_m de 1,51 ; 1,24 et 0,84 g/g b.s (60,16 ; 55,36 et 45,65 % b.h) et à une vitesse de 1,29 ; 0,72 et 0,9 g d'eau/g m.s/h respectivement. Ces points correspondent à l'évaporation de 2,13; 1,91 et 2,27 g/g b.s soit 68,05 ; 65,64 et 69,42 % sur base humide.

La vitesse de séchage montre une évaporation plus élevée au début avec $(-dX/dt)_i$ élevée jusqu'au point d'inflexion avec changement de l'allure de la courbe et abaissement de la vitesse au fur et à mesure que la teneur en eau résiduelle diminue.

La diminution de la quantité d'eau évaporée à partir du point d'inflexion, ainsi que la faible vitesse à partir de ce changement de pente, nécessite une durée plus longue jusqu'à X_{mf} qui

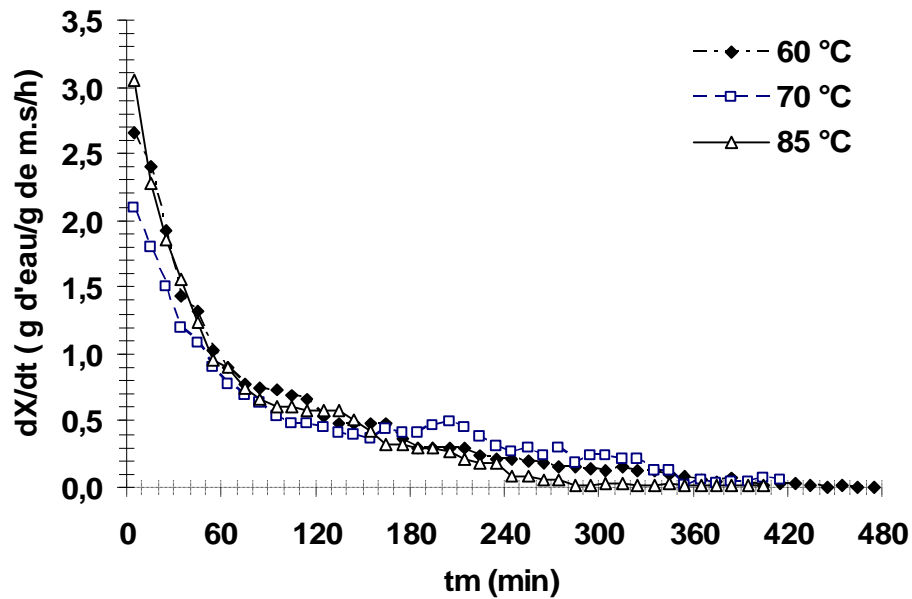
est de 5h 20min (320min) à 60 °C; 5h 30 (330 min) à 70 °C et 4h 30 min (270 min) à 85 °C pour évaporer 59,56 ; 54,0 et 43,79 % sur base humide. Ce temps correspond à 83,1 ; 79,5 et 76,1 % de la durée totale respective (60 et 70 °C, et 85°C) du séchage

►► Sur les figures 45 b et 45 c de l'épaisseur $8.9 \pm 0,3$ mm, les courbes démarrent au temps initial ($t_{mi} = 5$ min) avec des vitesses initiales $(-dX/dt)_i$ de séchage différentes où celle de 85 °C est la plus élevée avec 3,048 g d'eau/g m.s/ h correspondant à une teneur en eau initiale X_{mi} de 3,09 g/g b.s (75,55 % b.h), suivie par celle de 60 °C avec 2,66 g d'eau/g m.s/h et une X_{mi} de 3,47 g/g b.s (77,63 % b.h) et enfin la température 70 °C a la plus faible vitesse initiale de 2,088 g/g m.s/h correspondant à X_{mi} de 3,174 g/g b.s (76,04 % b.h).

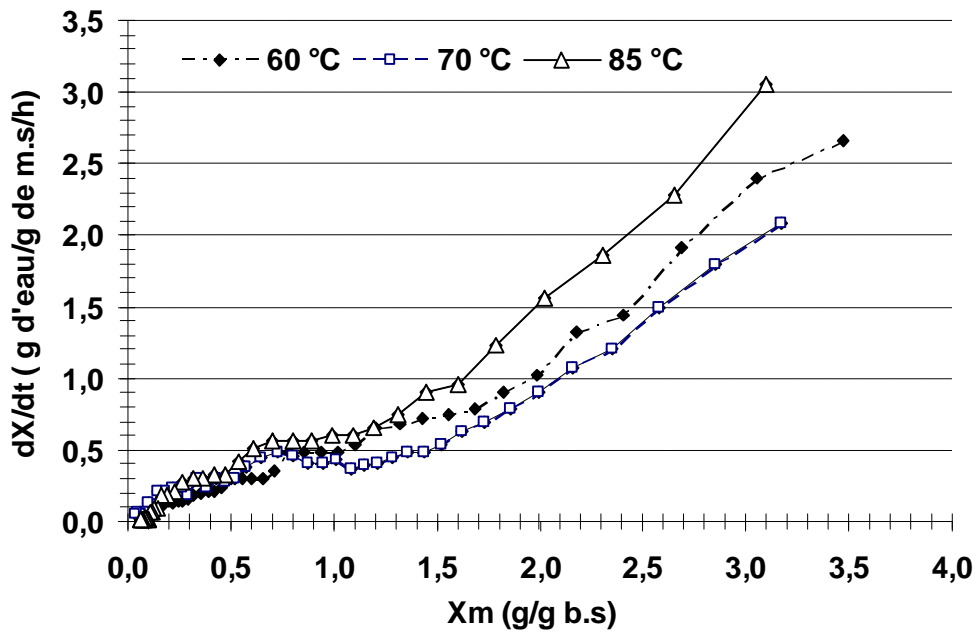
Au cours du séchage les trois courbes de 60 °C ; 70 °C et 85°C évoluent de façon séparée du début du séchage et se chevauchent à des niveaux de teneurs en eau d'environ 0,80 g/g b.s où celle de 60 °C qui évolue avec une vitesse plus élevée que celle de 70 °C et maintient sa décroissance rapide jusqu'au point de rencontre avec les deux autres courbes.

Dans la figure 45 b, il apparaît que les courbes de 85 et 60°C se rapprochent au début du séchage à 15 min ($dX/dt = 2,4$ g/g m.s/h) et se confondent où l'effet de la température s'atténue jusqu'à $t_m = 75$ min ($dX/dt = 0,75$ g/g m.s/h) de séchage. Cette partie montre que le séchage se déroule à des vitesses rapprochées, ensuite la décroissance devient plus rapide à 85°C qu'à 60°C. Au contraire sur la figure 45 c, il apparaît que l'effet est diminué entre les courbes qui se rapprochent en fin de séchage à des teneurs en eau basses puis l'effet de vient moins important où celle de 60°C montre une vitesse de décroissance plus importante. Les trois courbes évoluent séparément à des vitesses et teneurs en eau différentes montrant l'importance de l'effet de la température de l'air sur ces rondelles jusqu'aux teneurs en eau résiduelles jusqu'à la fin du séchage.

► Les courbes de séchage des températures de 60 ; 70 et 85 °C montrent qu'à $\Delta t = 6$ h 15 min (375 min); 5h45min (345min) et 4h45 min (285 min) , les rondelles atteignent la teneur en eau moyenne sur base sèche $X_{m1} = 0,10$ et 0,099 g/g b.s (9,09 et 9,0 % sur b.h) respectivement pour 60 °C et 70 et 85 °C. Cette durée a été suffisante pour éliminer ΔX_{m1} de 3,372; 3,076 et 2,995 g d'eau /g de masse sèche soit 77,13; 75,47 et 74,97 % sur base humide de la totalité de l'eau contenue dans la pomme de terre.



b : Vitesse de séchage de rondelles de Pomme de terre de 8,9 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de rondelles de Pomme de terre 8,9 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(X_m)$

Figure 45 : Effet de la température de l'air sur la vitesse de séchage de rondelles de pomme de terre de 8,9 mm d'épaisseur, (b)- $dX/dt = f(t_m)$ et (c) $dX/dt = f(X_m)$

La teneur en eau moyenne finale est atteinte après 1 h40 min; 1h 10 min et 2h (100 ; 70 et 120 min) de plus pour éliminer respectivement 3,7 ; 5,9 et 3,6 % b.s (3,57; 5,57 et 3,47 % b.h) d'eau restante de X_{m1} jusqu'à X_{mf} de 0,063 ; 0,04 et 0,06 g/g b.s (5,93 ; 3,85 et 6,01 % b.h).

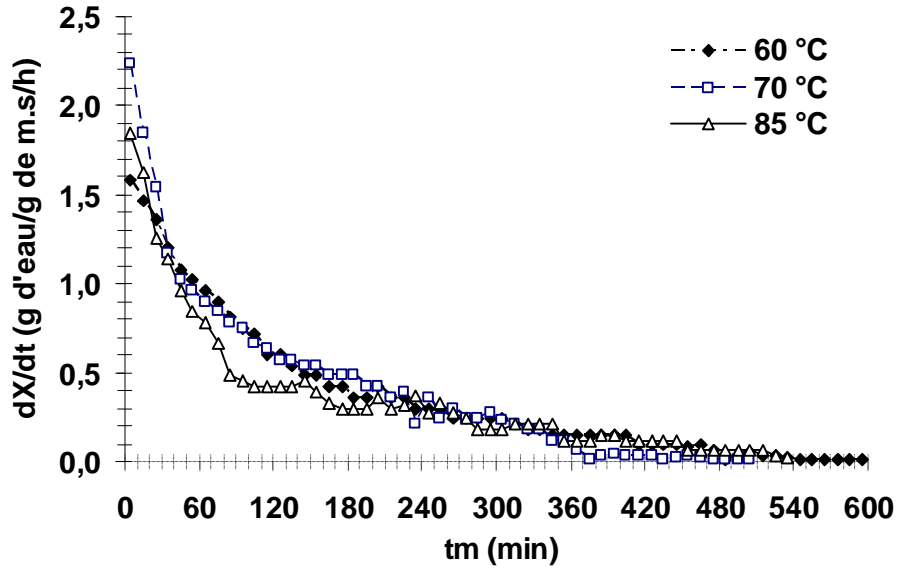
Le temps Δt de 7 h55; 6h 55 min et 6h 45 min (475; 415 et 405 min) correspond à l'évaporation de ΔX_{mt} 3,409; 3,135 et 3,031 g d'eau /g de m.s soit 77,32 ; 75,82 et 75,19 % b.h (g d'eau évaporée par 100 g de masse humide) au cours du séchage de ces rondelles de pomme de terre de 8,9 mm d'épaisseur.

Ce comportement de la courbe de 60 °C avec une vitesse plus élevée et une quantité d'eau évaporée plus que celle des deux autres températures est due à la teneur en eau de départ de la pomme de terre séchées à cette température qui est plus élevée 78,69 % sur base humide (3,693 g/g b.s) et de 77 % sur base humide (3,35 g/g b.s) pour celle de 70 et 85°C Ceci dit, l'effet de la température trouve son importance dans la durée de séchage respective qui est plus courte à 85 °C que pour les deux autres.

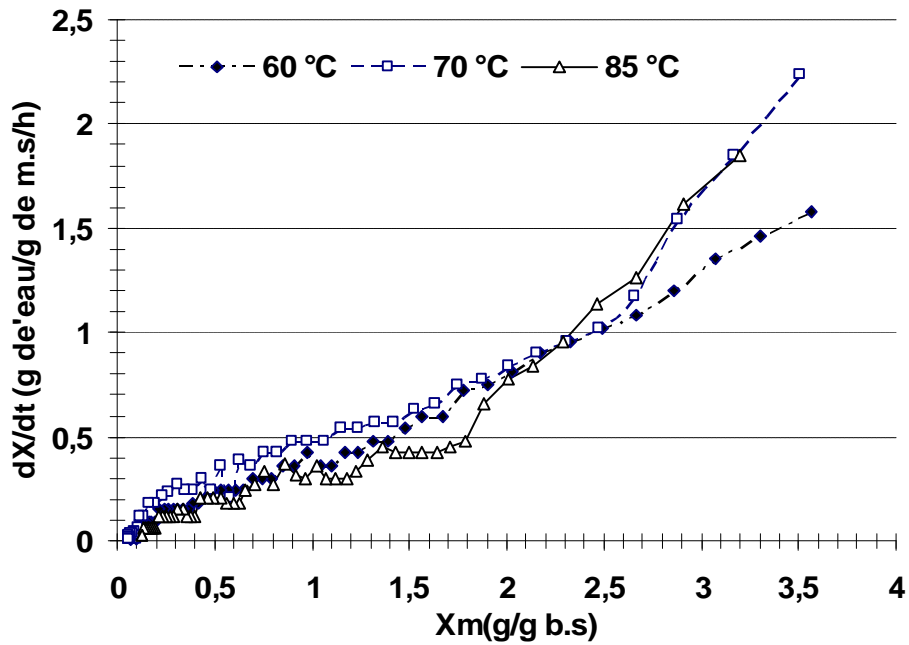
► Le changement de pente est observé (figure 45 b et 45 c) à 75min (60 °C) et à 95min (70 °C) et 55 min (85 °C) de séchage, il correspond à X_m de 1,69 ; 1,53 et 1,61 g/g b.s (62,82 ; 60,16 et 61,68 % b.h) et à une vitesse de 0,78 ; 0,54 et 0,96 g d'eau/g m.s/h respectivement. Ces points correspondent à l'évaporation de 1,79; 1,65 et 1,49g/g b.s soit 64,16 ; 62,26 et 59,84 % sur base humide.

La vitesse de séchage montre une évaporation plus importante au début avec $(-dX/dt)_i$ élevée jusqu'au point d'inflexion avec changement de l'allure de la courbe et abaissement de la vitesse au fur et à mesure que la teneur en eau résiduelle diminue

La diminution de la quantité d'eau évaporée à partir du point d'inflexion, ainsi que la faible vitesse à partir de ce changement de pente, nécessite une durée plus longue jusqu'à X_{mf} qui est de 6h 40min (400min) à 60 °C; 5h20min (320 min) à 70 °C et 5h 50 min (350 min) à 85 °C pour évaporer 1,62 ; 1,49 et 1,54 g/g b.s soit 61,83 ; 59,84 et 60,63 % sur base humide. Ce temps correspond à 84,2 ; 77,1 et 86,4 % de la durée totale respective (60 et 70 °C, et 85°C) du séchage.



b : Vitesse de séchage de rondelles de Pomme de terre de 12,9 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de rondelles de Pomme de terre de 12,9 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(X_m)$

Figure 46 : Effet de la température de l'air sur la vitesse de séchage de rondelles de pomme de terre de 12,9 mm d'épaisseur, (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

►► Sur les figures 46 b et 46 c de l'épaisseur $12.9 \pm 0,3$ mm, les courbes démarrent au temps initial ($t_{mi} = 5$ min) avec des vitesses initiales $(-dX/dt)_i$ de séchage différentes où celle de 70°C est la plus élevée avec $2,24$ g d'eau/g m.s/ h correspondant à une teneur en eau initiale X_{mi} de $3,51$ g/g b.s ($78,31\%$ b.h), suivie par celle de 85°C avec $1,85$ g d'eau/g m.s/h et une X_{mi} de $3,194$ g/g b.s ($76,16\%$ b.h) et enfin la température 60°C a la plus faible vitesse initiale de $1,58$ g/g m.s/h correspondant à X_{mi} de $3,56$ g/g b.s ($78,07\%$ b.h).

Au cours du séchage les trois courbes de 60°C ; 70°C et 85°C se chevauchent où les vitesses de séchage de 70 et 85°C sont rapprochées à $1,85$ g/g m.s/h et X_m de $3,19$ g/g b.s jusqu'à $1,54$ g/g m.s/h et $2,84$ g/g b.s où elle se séparent entre 15 et 25 min (figure 46 b et c). Ensuite celle de 85°C décroît plus rapidement que les deux autres qui elles se confondent à $1,02$ g/g m.s/h et $2,48$ g/g b.s jusqu'au point de séparation à $0,9$ g/g m.s/h et $2,17$ g/g b.s entre 45 et 75 min de séchage.

Ce rapprochement des courbes atténue l'effet de la température de séchage. Ensuite celle de 70°C maintient une vitesse plus élevée que celle de 60°C qui elle décroît plus rapidement. Cependant, dans ce cas (figure 46 c) la courbe de vitesse de séchage de 70°C montre une évolution avec une vitesse de séchage la plus importante des trois courbes du début jusqu'à la fin du séchage. L'effet devient moins important à partir des basses teneurs en eau résiduelles inférieures à $0,2$ g/g b.s à la fin du séchage.

► Les courbes de séchage des températures de 60 ; 70 et 85°C montrent qu'à Δt $8\text{h } 05\text{min}$ (485 min); $6\text{h } 15\text{min}$ (375min) et $8\text{h } 55\text{ min}$ (535 min) , les rondelles atteignent la teneur en eau moyenne sur base sèche $X_{m1} = 0,10$; $0,099$ et $0,123$ g/g b.s ($9,09$; $9,0$ et $10,95\%$ sur b.h) respectivement pour 60 ; 70 et 85°C . Cette durée est suffisante pour éliminer ΔX_{m1} de $3,462$; $3,41$ et $3,071$ g d'eau /g de masse sèche soit $77,59$; $77,31$ et $75,44\%$ sur base humide de la totalité de l'eau contenue dans la pomme de terre.

La teneur en eau moyenne finale est atteinte à 60 et 70°C après $1\text{ h } 50$ et $2\text{ h } 10\text{ min}$ (110 et 130 min) de plus pour éliminer respectivement $3,5$ et $4,6\%$ b.s ($3,38$ et $4,4\%$ b.h) d'eau restante de X_{m1} jusqu'à X_{mf} de $0,065$ et $0,055$ g/g b.s ($6,1$ et $5,21\%$ b.h). Le séchage à 85°C est atteint à X_{mf} de $0,123$ g/g b.s soit $10,95\%$ b.h.

Le temps Δt_t de $9\text{h } 55\text{min}$; $8\text{h } 25\text{ min}$ et $8\text{h } 55\text{ min}$ (595 ; 505 et 535 min) correspond à l'évaporation de ΔX_{mt} $3,497$; $3,453$ et $3,071$ g d'eau /g de m.s soit $77,76$; $76,54$ et $75,45\%$

b.h (g d'eau évaporée par 100 g de masse humide) au cours du séchage de ces rondelles de pomme de terre de 12,9 mm d'épaisseur.

Le comportement de la courbe de 70 °C avec une vitesse plus élevée et une quantité d'eau évaporée plus que celle des deux autres températures est due à la teneur en eau de départ de la pomme de terre qui est plus élevée 78,69 % sur base humide (3,693 g/g b.s) pour 60 et 70 °C et de 77 % sur base humide (3,35 g/g b.s) pour celle de 85°C.

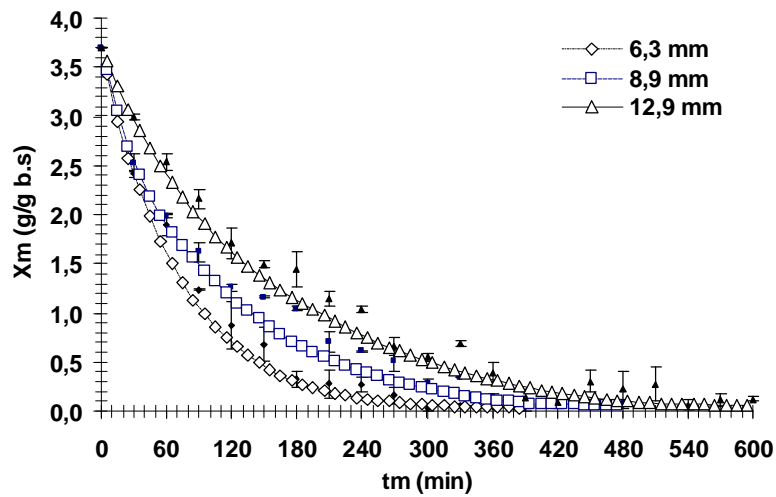
► Le changement de pente est observé (figure 46 b et 46 c) à 115min (60 °C) et à 45min (70 °C) et 85 min (85 °C) de séchage, il correspond à X_m de 1,67 ; 2,48 et 1,79 g/g b.s (62,55 ; 71,26 et 61,16 % b.h) et à une vitesse de 0,6 ; 1,02 et 0,48 g d'eau/g m.s/h respectivement. Ces points correspondent à l'évaporation de 1,89; 1,03 et 1,37g/g b.s soit 64,4 ; 50,74 et 58,33 % sur base humide.

La vitesse de séchage montre une évaporation plus importante au début avec $(-dX/dt)_i$ élevée jusqu'au point d'inflexion avec changement de l'allure de la courbe et abaissement de la vitesse au fur et à mesure que la teneur en eau résiduelle diminue.

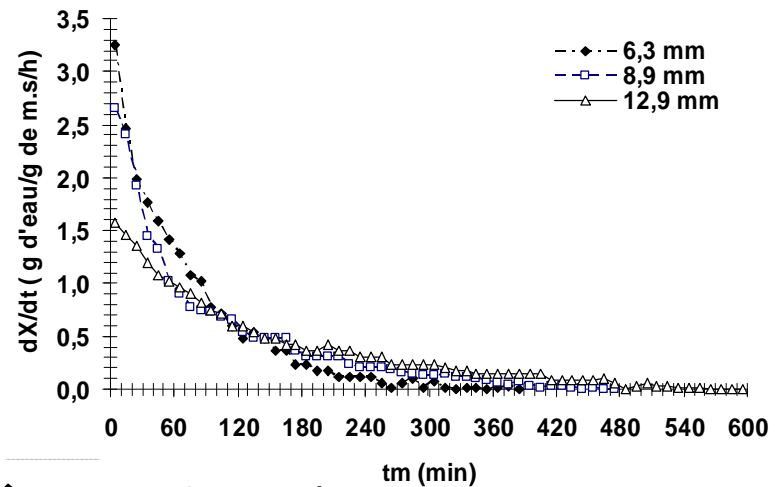
La diminution de la quantité d'eau évaporée à partir du point d'inflexion, ainsi que la faible vitesse à partir de ce changement de pente, nécessite une durée plus longue jusqu'à X_{mf} qui est de 8h (480min) à 60 °C; 7h40 min (460 min) à 70 °C et 7h 30 min (450 min) à 85 °C pour évaporer 1,61 ; 2,42 et 1,67 g/g b.s soit 61,68 ; 70,76 et 62,55 % sur base humide. Ce temps correspond à 80,7 ; 91,1 et 84,1 % de la durée totale respective (60 et 70 °C, et 85°C) du séchage.

5-1-2-Effet de la dimension sur la cinétique et la vitesse de séchage

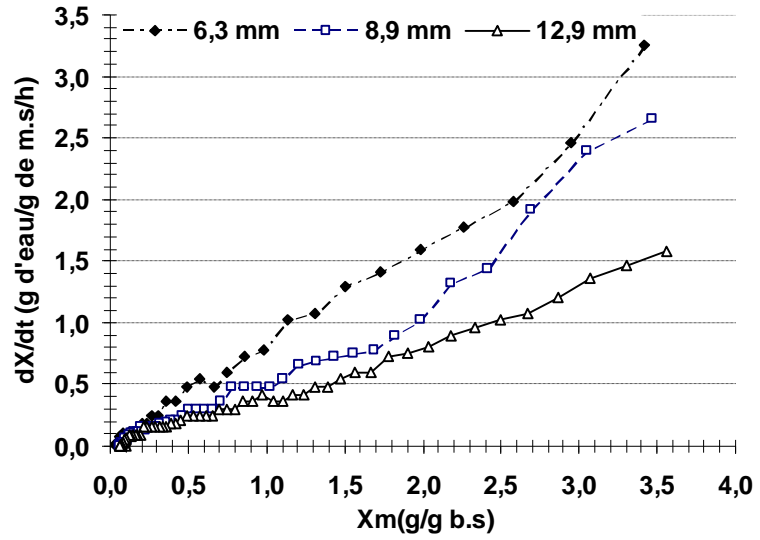
►► Pour montrer l'effet de la taille de découpe sur les cinétiques et vitesses de séchage des rondelles séchées à 60 °C, la figure 47 (a,b et c) montre un effet important où les courbes des trois épaisseurs évoluent distinctement l'une de l'autre avec des vitesses initiales différentes de 3,26 ; 2,66 et 1,58 g/g m.s/h correspondant à des teneurs en eau initiales ($t_{mi} = 5$ min) de 3,42 ; 3,47 et 3,56 g/g b.s (77,37 ; 77,63 et 78,07 % b.h). Il ressort que la vitesse la plus élevée est assurée par l'épaisseur la plus fine (6,3 mm) suivie par celle de 8,9 mm et la plus faible est assurée par l'épaisseur la plus large 12,9 mm. La durée de séchage suffisante pour atteindre X_{m1} et X_{mf} est plus courte avec 6,3 mm que celle de 8,9 mm et la plus longue durée est celle de 12,9 mm.



a : Effet de la découpe sur la cinétique de séchage de rondelles de Pomme de terre séchées à 60 °C, $X_m=f(t_m)$



b : Vitesse de séchage de rondelles de Pomme de terre à 60 °C, $dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de rondelles de Pomme de terre séchées à 60 °C ; $dX/dt = f(X_m)$

Figure 47 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage de rondelles de pomme de terre séchées à 60 °C, (a) $X_m=f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

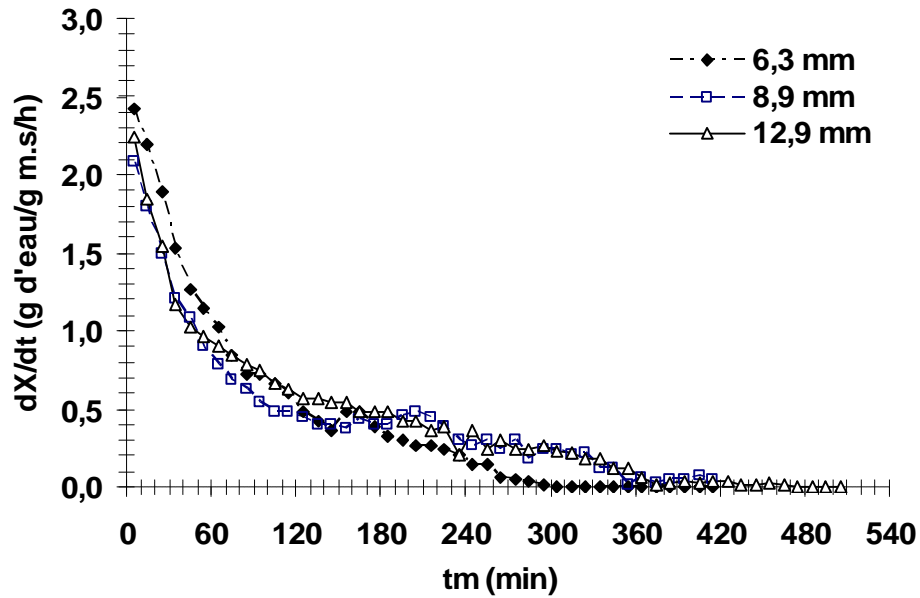
Le temps mis à atteindre le point d'inflexion est plus court (65 min) avec 6,3 mm pour une quantité d'eau évaporée (2,13 g/g b.s soit 68,05 % b.h) plus élevée que celles des épaisseurs de 8,9 et 12,9 mm qui assurent un temps de 75 et 115 min et ΔX_m moins important (1,79 et 1,89 g/g b.s soit 64,16 et 65,4 % b.h). Le temps le plus long est assuré par l'épaisseur 12,9 mm pour une évaporation supérieure à celle de 8,9 mm et moins importante que celle de 6,3 mm.

La difficulté d'extraire la quantité d'eau restante après le point de changement de pente est apparente chez l'épaisseur large de 12,9 mm que chez les deux autres. En 8h il est évaporée 1,61g/g b.s (61,67 % b.h) avec 12,9 mm à comparer avec celle de 8,9 mm qui assure une évaporation de 1,62 g/g b.s (61,83 % b.h) en 6h 40 min et celle de 6,3mm assure une élimination de 1,47 g/g b.s (59,51 % b.h) en 5h 20 min seulement. Les temps respectifs de cette évaporation représentent la part la plus importante de la durée totale du séchage jusqu'à X_{mf} .

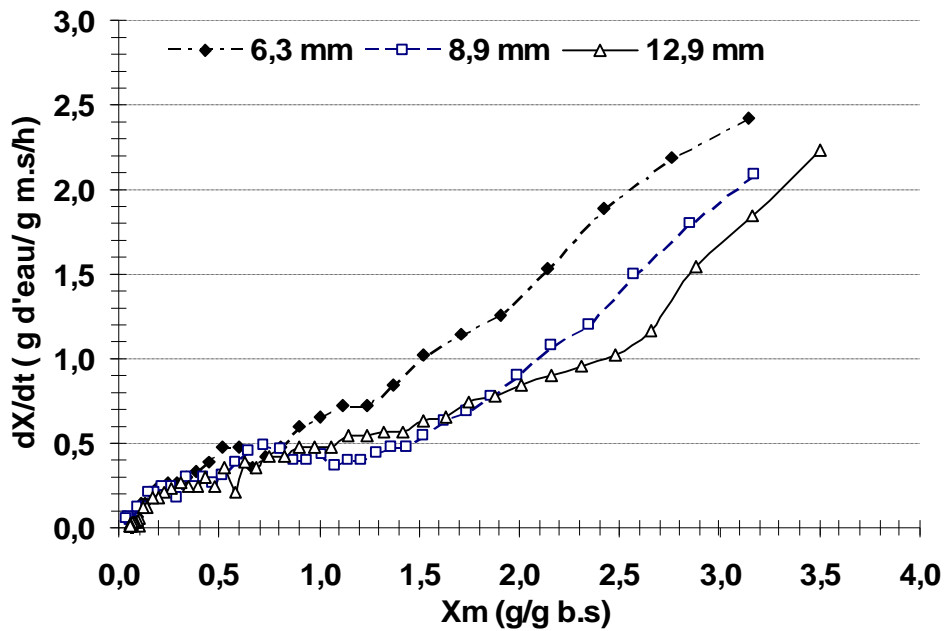
►► La figure 48 (b et c) montre l'effet de la taille de découpe sur la vitesse de séchage des rondelles de pomme de terre à 70 °C où il apparaît que les courbes des trois épaisseur évoluent distinctement avec des vitesses initiales différentes l'une de l'autre de 2,42 ; 2,09 et 2,24 g/g m.s/h correspondant à des teneurs en eau initiales ($t_{mi} = 5$ min) de 3,15 ; 3,17 et 3,51 g/g b.s (75,9 ; 76,02 et 77,83 % b.h). Il ressort que la vitesse la plus élevée est assurée par l'épaisseur la plus fine (6,3 mm) suivie par celle de 12,9 mm et la plus faible est assurée par l'épaisseur 8,9 mm.

La durée de séchage suffisante pour atteindre X_{m1} (4h25 min; 5h 45 min et 6h 15min) et X_{mf} (6h55min pour 6,3 et 8,9 mm ,et 8h 25min pour 12,9 mm); est plus courte avec 6,3 mm que celle de 8,9 mm et la plus longue durée est celle de 12,9 mm.

Le temps mis à atteindre le point d'inflexion est 85 min avec 6,3 mm pour une quantité d'eau évaporée (1,91 g/g b.s soit 65,64 % b.h) plus élevée que celles des épaisseurs de 8,9 et 12,9 mm qui assurent un temps de 95 et 45 min et ΔX_m moins important (1,65 et 1,03 g/g b.s soit 62,24 et 50,74 % b.h). Le temps le plus long est assuré par l'épaisseur 8,9 mm et le plus court est assuré par l'épaisseur de 12,9 mm avec une quantité d'eau évaporée la moins importante des trois .La quantité d'eau évaporée par les rondelles de 6,3 mm est la plus élevée des trois épaisseurs.



b : Vitesse de séchage de rondelles de Pomme de terre séchées à 70 °C ; $dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de rondelles de Pomme de terre séchées à 70 °C ; $dX/dt = f(X_m)$

Figure 48 : Effet de la taille de découpe sur la vitesse de séchage de rondelles de pomme de terre séchées à 70 °C, (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

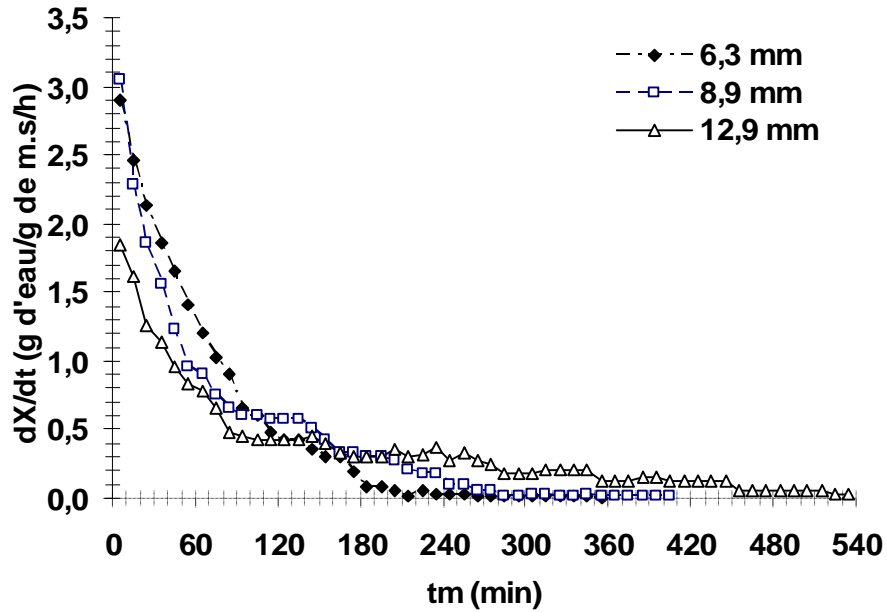
La difficulté d'extraire la quantité d'eau restante après le point de changement de pente est apparente chez l'épaisseur large de 12,9 mm que chez les deux autres. En 7h 40 min il est évaporée 2,42 g/g b.s (70,76 % b.h) avec 12,9 mm à comparer avec celle de 8,9 mm qui assure une évaporation de 1,49 g/g b.s (59,94 % b.h) en 5h 20 min et celle de 6,3mm assure une élimination de 1,17 g/g b.s (53,92 % b.h) en 5h 30 min. Les temps respectifs de cette évaporation représentent la part la plus importante de la durée totale du séchage jusqu'à X_{mf} .

►► La figure 49 (b et c) montre l'effet de la taille de découpe sur la vitesse de séchage des rondelles de pomme de terre à 85 °C où il apparaît que les courbes des trois épaisseurs évoluent distinctement l'une de l'autre jusqu'aux basses teneurs en eau <0,2 g/g b.s (16, 67% b.h) avec des vitesses initiales différentes de 2,9 ; 3,05 et 1,85 g/g m.s/h correspondant à des teneurs en eau initiales ($t_{mi} = 5$ min) de 3,11 ; 3,09 et 3,19 g/g b.s (75,67 ; 75,55 et 76,13 % b.h). Il ressort que la vitesse la plus élevée est assurée par l'épaisseur 8,9 mm suivie par celle de 6,3 mm et la plus faible est assurée par l'épaisseur 12,9 mm.

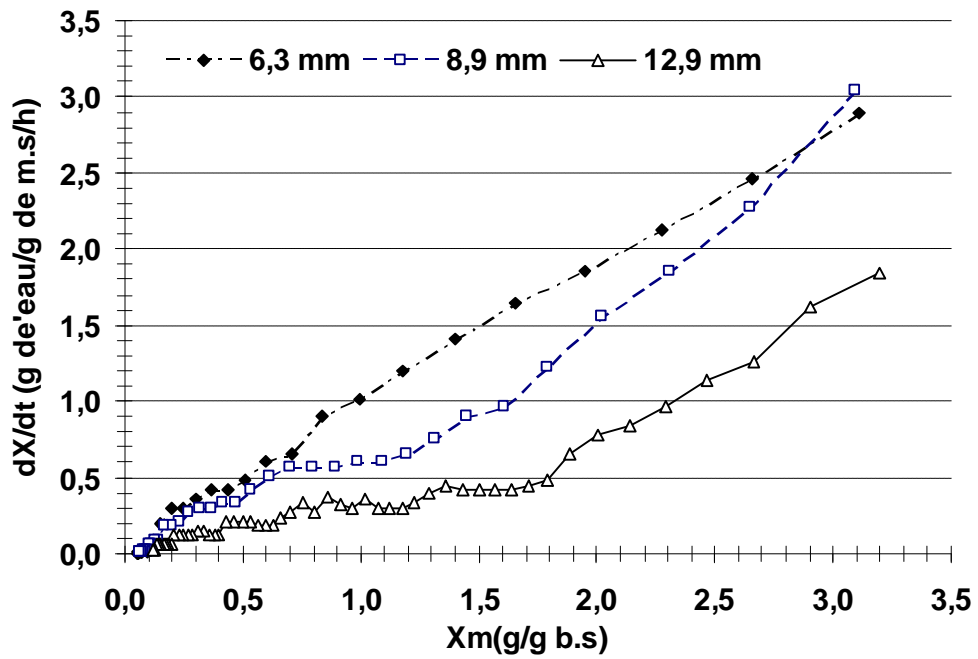
La durée de séchage suffisante pour atteindre X_{m1} (3h05 min; 4h 45 min et 8h 55min) et X_{mf} (5h55min pour 6,3 et 6h 45 min pour 8,9 mm), et 8h 55min pour 12,9 mm; est plus courte avec 6,3 mm que celle de 8,9 mm et la plus longue durée est celle de 12,9 mm pour atteindre une teneur en eau supérieure à 10 % b.s.

Le temps mis à atteindre le point d'inflexion est 85 min avec 6,3 et 12,9 mm pour une quantité d'eau évaporée (2,27 et 1,40 g/g b.s soit 69,42 et 58,33 % b.h) plus élevée avec 6,3 mm que 8,9 mm (55 min) qui assure un ΔX_m moins important (1,49 g/g b.s soit 59,84 % b.h) mais plus élevée que celle de 12,9 mm. Le temps le moins long est assuré par l'épaisseur 8,9 mm et le plus long est assuré par l'épaisseur de 6,3 et 12,9 mm avec une quantité d'eau évaporée la plus importante des trois est celle de 6,3 mm suivie par celle de 8,9 mm. La quantité d'eau évaporée par les rondelles de 12,9 mm est la moins élevée des trois épaisseurs.

La difficulté d'extraire la quantité d'eau restante après le point de changement de pente est apparente chez l'épaisseur large de 12,9 mm que chez les deux autres. En 7h 30 min, il est évaporée 1,67 g/g b.s (62,55 % b.h) avec 12,9 mm à comparer avec celle de 8,9 mm qui assure une évaporation de 1,54 g/g b.s (60,63 % b.h) en 5h 50 min et celle de 6,3mm assure une élimination de 0,78 g/g b.s (43,82 % b.h) en 4h 30 min. Les temps respectifs de cette évaporation représentent la part la plus importante de la durée totale du séchage jusqu'à X_{mf} et il est plus court avec 6,3 mm que les deux autres épaisseurs.



b : Vitesse de séchage de rondelles de Pomme de terre séchées à 85 °C ; $dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de rondelles de Pomme de terre séchées à 85 °C ; $dX/dt = f(X_m)$

Figure 49 : Effet de la taille de découpe sur la vitesse de séchage de rondelles de pomme de terre séchées à 85 °C, (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

5-1-3- Discussion et conclusion

Les courbes de cinétique et vitesse de séchage de rondelles de pomme de terre coupée en trois épaisseurs (6,3 ; 8,9 et 12,9 mm), séchées à trois températures (60 ; 70 et 85°C), montrent l'absence de phase de séchage constante. L'évolution du séchage s'effectue en phase à allure de séchage décroissante, qui peut être divisée en deux sous phases selon la température et l'épaisseur des rondelles.

LESCANO (1983), Lors du séchage à l'air chaud de la pomme de terre rapporte l'absence de la période de séchage à régime constant et l'existence de plus de trois périodes à régime décroissant dans le cas des bâtonnets (1x1x4 cm) et des tranches (1x5 cm de diamètre). Dans ce travail, l'auteur rapporte que les modifications physiques et chimiques ainsi causées affectent également les taux de séchage ; les tubercules cuits à la vapeur par exemple, sèchent plus lentement que les crues.

La forme et les dimensions du produit mis à sécher influent sur le processus. Les résultats des courbes de séchage montrent que les bâtonnets (1x1x4cm) sèchent plus rapidement que les tranches de 1 cm d'épaisseur et de 5 cm de diamètre, et que si l'épaisseur de ces dernières n'est que de 0,5 cm, le séchage est accéléré (plus que les 2 autres formes).

La durée de séchage des rondelles de 6.3 mm aux trois températures est assez courte et celles séchées à 85 °C assurent le temps le plus court des trois températures suivie par celles de 8,9 mm et la plus longue est observée chez les rondelles de 12,9 mm d'épaisseur. La petite épaisseur assure des vitesses de séchage plus élevées que les autres épaisseurs. L'effet paraît moins important avec l'épaisseur large dont les courbes se chevauchent minimisant l'effet de la température.

L'étude de AKPINAR KAVAK (2006) du séchage en couche mince pour comprendre le comportement de la pomme de terre, pomme et disques de citrouille (potiron). Les expériences de séchage sont conduites à 60; 70 et 80°C avec une vitesse de l'air de 1; 1.5m/s. Le séchage est maintenu jusqu'à un contenu en humidité finale atteinte de 10 % (b.s); 13 % (b.s), 6 % (b.s) respectivement.

L'auteur rappelle que les phénomènes de séchage des produits biologiques se passent au cours de la phase de séchage à vitesse décroissante et sont contrôlés par les mécanismes de diffusion liquide et/ou de diffusion de vapeur. Ce comportement suggère qu'il est fortement influencé par le transfert interne de diffusion de l'humidité qui contrôle ce phénomène.

Le séchage ne présentant que des périodes de séchage à régime décroissant; les rondelles de 6,3 mm, séchant à deux vitesses (ou sous phases) de décroissance, avec une première sous phase rapide relative au départ de l'eau faiblement liée et une deuxième sous phase ralentie, jusqu'à la fin du séchage relative au départ de l'eau plus fortement liée que la première.

L'effet de la température paraît plus intéressant sur les cinétiques et vitesses de séchage par rapport à la première sous phase qui est délimité par les différents points d'inflexion où la quantité d'eau évaporée correspondant à l'eau moins liée est assurée par la température la plus élevée et la plus fine des épaisseurs. Il est montré aussi que la deuxième sous phase de décroissance, qui correspond à l'eau de plus en plus liée plus difficile à évaporer, est plus lente dont les durées respectives ont montré que les proportions sont comprises entre 75 et 91% par rapport à la durée totale du séchage.

L'évolution des courbes de séchage se fait en forme d'escalier en deuxième sous phase pour les deux épaisseurs de 8,9 et 12,9 mm montrant la difficulté du départ de l'eau de l'intérieur à la surface des rondelles à partir des X_m des points d'inflexions respectifs jusqu'à la fin du séchage.

L'influence de l'épaisseur des rondelles de pomme de terre sur la cinétique de séchage est très importante, ce qui est montré sur les figures 47 à 49 où les courbes de cinétique et de vitesse des trois épaisseurs séchées avec la même température évoluent de manière distincte. La plus fine séchant plus rapidement que celle qui lui est supérieure, et enfin la plus épaisse séchant plus lentement que les deux autres.

Cela montre l'importance de l'effet de la taille de découpe associé à celui de la température de l'air de séchage où il est montré pour la majorité des courbes qu'il est significativement important.

La vitesse de séchage de départ représentée par les différentes courbes est relativement basse, exception faite pour celle de 6,3 mm aux trois températures qui est légèrement supérieure aux autres.

Ce phénomène est probablement dû au durcissement de la surface des rondelles et à la structure compacte du légume qui ne permet pas à l'évaporation de l'eau de se faire aussi rapidement que les autres légumes. La gélatinisation probable de l'amidon dont la pomme de terre est assez riche (14,3 g/100g selon FAVIER et coll.1995), est aussi un autre facteur limitant que l'on peut rajouter au ralentissement du processus.

5-1-4- Activité de l'eau (a_w) de la pomme de terre à l'état frais et séché

La pomme de terre fraîche est râpée afin de permettre l'échange avec les solutions d'acide aux diverses HRE% jusqu'à l'équilibre. La masse initiale des prises d'essais est présentée avec les variations de masse dans le tableau 23 a.

Les rondelles utilisées pour la réalisation de cette mesure ont été séchées deux (02) mois auparavant, conditionnées dans des sachets de polyéthylène thermo soudé et conservées à température ambiante du laboratoire.

Le mélange est obtenu à partir de rondelles séchées à 60 °C de l'épaisseur 12,9 mm (7,7 g) ; à 70 °C d'épaisseur 8,9 mm (7,55 g) et enfin à 85 °C avec l'épaisseur de 8,9 mm (11,84 g). La teneur en eau finale moyenne est de $0,035 \pm 0,02$ g/g b.s

Le mélange est broyé en poudre, pesé et mis à l'intérieur des différents bocaux contenant les solutions d'acide sulfurique ayant des HRE variées. Les échantillons sont maintenus à température ambiante jusqu'à l'équilibre et stabilisation de leur poids durant 5 jours.

La température moyenne mesurée au cours des cinq jours de la détermination de l'activité de l'eau de la pomme de terre à l'état frais est de $28 \pm 1,7$ °C et séchée est de $22,3 \pm 1,6$ °C.

Tableau 23 a : Moyenne de la masse initiale et de la variation de masse des 3 essais (fraîche)

Concentration d'H ₂ SO ₄ % (v/v)	6	15	27	mi moyen (g)
HRE % à 25°C	96,6	90,91	78,97	
mi moyen (g)	$2,54 \pm 0,47$	$2,67 \pm 0,46$	$2,73 \pm 0,41$	$2,65 \pm 0,44$
$\Delta m = (m_i - m_f / m_i) \%$	0,295	0,428	0,874	

Tableau 23 b : Moyenne de la masse initiale et de la variation de masse des 3 essais (sèche)

Concentration d'H ₂ SO ₄ % (v/v)	36	46	64	88	mi moyen (g)
HRE % à 25°C	64,57	43,82	10,89	0,082	
mi moyen (g)	$1,09 \pm 0,03$	$1,05 \pm 0,01$	$1,05 \pm 0,002$	$1,04 \pm 0,01$	$1,06 \pm 0,02$
$\Delta m = (m_i - m_f / m_i) \%$	0,02	0,04	0,05	0,06	

Les courbes de mesure de l'activité de l'eau de la pomme de terre fraîche et sèche sont présentées dans la figure 50 a et b.

La moyenne des variations de masse en pourcentage rapportée à la masse initiale des trois essais réalisés permet de donner les points pour tracer la courbe à partir de laquelle est tirée la valeur de l' a_w de nos échantillons.

La détermination de la valeur de l'activité de l'eau est obtenue graphiquement à partir des courbes tracées pour chaque essai, avec un ajustement par une droite linéaire qui coupe l'axe des HRE au point correspondant à l'équilibre.

La figure 50 a montre le point d'intersection qui permet d'obtenir la valeur de l' a_w de la pomme de terre fraîche qui se situe à la valeur de 0,967.

La figure 50 b montre le point d'intersection de la moyenne de trois essais qui est situé à la valeur de $0,06 \pm 0,002$.

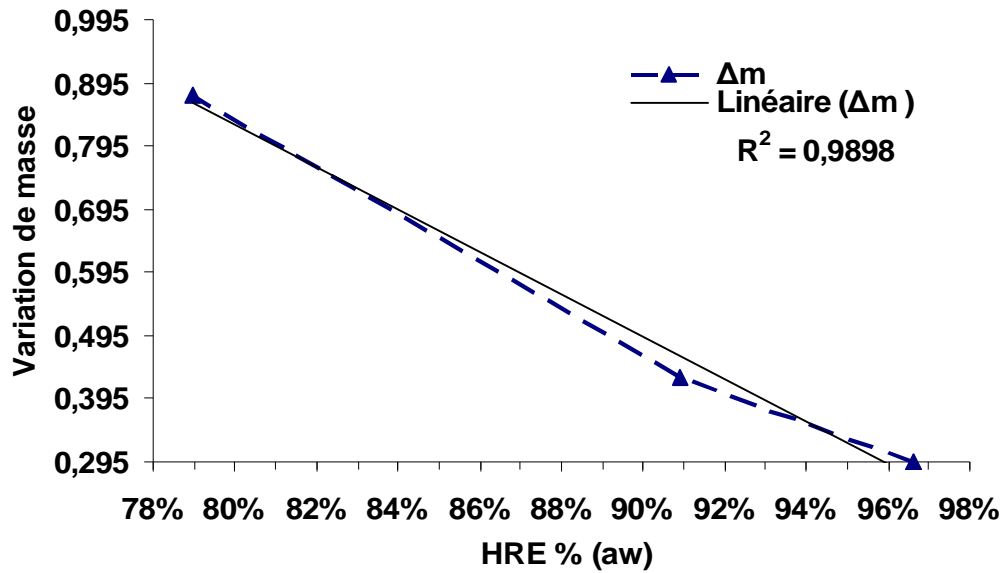
Ainsi la pomme de terre avec une teneur en eau initiale de 78,69 % sur base humide ($X_i=3,69$ g/g b.s) aurait une activité de l'eau a_w de 0,967. Les rondelles séchées aux teneurs en eau de 0,035 g/g b.s auraient une activité de l'eau (a_w) voisine de 0,06.

Ce niveau d'activité compris entre 0 et 0,2 correspond aux forces de liaisons très intenses empêchant le mouvement moléculaire de s'exprimer (MAFART, 1991), permet une durée de conservation de nos échantillons relativement longue, dans les conditions de température ambiante (25 ± 3 °C).

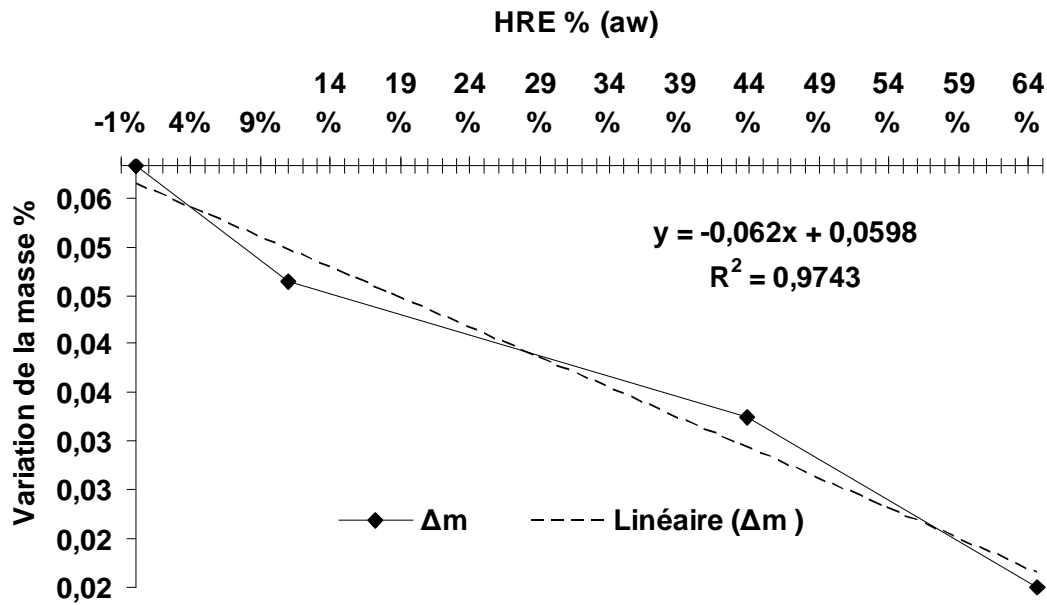
BIMBENET et coll., (2002 b) ,en rappelant que l'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année). Les teneurs en eau atteintes par le séchage de la pomme de terre permettent sa conservation pour une durée d'une année.

ROUX (1994), rapporte que la teneur en eau de 0,17-0,08 g/g de m.s (soit 14,5-7,4% base humide) et à partir d'une a_w de 0,3 le produit se conserve à l'abri de l'air (conditionnement) et à température ambiante.

ALAIS et coll. (2004) ; rapportent que l'oxydation des acides gras insaturés est très élevée dans les produits ayant une $a_w < 0,1-0,2$, par fixation de l'oxygène sur ces radicaux libres.



a : Mesure de l'activité de l'eau de la pomme de terre fraîche (aw = 0,967)



b : Mesure de l'Activité de l'eau de la Pomme de terre sèche, (aw = 0,06)

Figure 50 : Détermination de l'activité de l'eau de la pomme de terre (a) fraîche et (b) sèche.

La stabilité maximale est obtenue lorsque la monocouche des molécules d'eau ($a_w = 0,2$) s'oppose au passage de l'oxygène jusqu'au lipides ou entre en compétition avec les molécules d'oxygène pour occuper des sites d'absorption.

En général cette stabilité est obtenue lorsqu'il ne subsiste que la couche monomoléculaire d'eau (eau liée), ce qui correspond à une activité de l'eau de 0,1 à 0,2. L'eau liée représente entre 3-10 g/100g de poids sec (3-10% b.s).

Les produits aux a_w comme le notre doivent être conservés dans un emballage étanche à l'oxygène et opaque faisant barrière à la lumière et rayons du soleil pour éviter les risques d'oxydation et de décoloration du légume.

5-2-Evolution de la qualité du légume au cours du séchage

5-2-1-Rétrécissement et déformation

La variation de l'épaisseur et du diamètre des rondelles découpées, au début et à la fin séchage sont présentées dans les tableaux 24 a et 24 b.

- Le taux de rétraction axiale de la petite épaisseur 6,3 mm est plus important à 60 °C, il est de 64,0 % par rapport à celui des deux autres températures de 70 et 85 °C qui sont de 62,0 % et 26,2 %. Celui de 85 °C est le plus faible des trois.

Pour ce qui est du diamètre, le comportement est différent de celui de l'épaisseur, la rétraction est faible à 70 °C, de 20,9 %; alors qu'à 85 °C, elle est de 23,7 %.

On constate que la rétraction des rondelles coupées à 6,3 mm d'épaisseur évolue plus dans le sens axial (épaisseur) que celui du diamètre.

Ce comportement suit la même évolution que celle de la cinétique de séchage; plus les rondelles perdent de l'eau et plus elles se rétractent, ceci est montré sur la courbe de la figure 51 et illustré par les photos de la figure 52,53 et 54.

La figure 51 montre le taux de rétrécissement de rondelles de pomme de terre de 6,3 mm d'épaisseur séchées à 85 °C, qui évolue en fonction de la teneur en eau dans le produit. Ce comportement est observé avec l'ensemble des rondelles des autres épaisseurs séchées aux trois températures.

- Pour l'épaisseur de 8,9mm, le taux de rétraction le plus bas est noté à 85 °C, 37,0 %. Avec les températures de 60 °C et 70 °C, il est plus élevé, respectivement de 59,6 % et 62,8 %.

Tableau 24 a : Rétrécissement axial de rondelles de pomme de terre séchées.

T°de séchage (°C)	tps (min)	Xi b.s/xi b.h	Xf b.s	xf %b.h	épi de (mm)	épf (mm)	épf/épi %	Taux de rétraction%
60°C	390	3,693/78,69	0,054±0,001	5,12	6,50	2,34	36,0	64,0
	480		0,078±0,05	7,24	8,50	3,43	40,4	59,6
	600		0,125±0,02	11,11	13,00	3,30	25,4	74,6
70°C	420	3,348/77,0	0,066±0,03	6,19	6,40	2,43	38,0	62,0
	420	3,693/78,69	0,027±0,02	2,63	8,80	3,27	37,2	62,8
	510		0,03±0,06	5,66	12,50	4,00	32,0	68,0
85°C	360	3,348/77,0	0,04±0,055	5,21	6,00	4,43	73,8	26,2
	405		0,02±0,042	4,03	9,00	5,67	63,0	37,0
	540		0,03±0,133	11,74	13,13	5,87	44,7	55,3

Tableau 24 b : Rétrécissement diamétral de rondelles de pomme de terre séchées

T°de séchage (°C)	tps (min)	Xi b.s/xib.h	Xf b.s	xf %b.h	di (cm)	df (cm)	df/di%	Taux de rétraction%
60°C	390	3,693/78,69	0,054±0,001	5,12				
	480		0,078±0,05	7,24	4,50	3,15	70,0	30,0
	600		0,125±0,02	11,11				
70°C	420	3,348/77,0	0,066±0,03	6,19	5,80	4,59	79,1	20,9
	420	3,693/78,69	0,027±0,02	2,63	7,05	4,63	65,7	34,3
	510		0,03±0,06	5,66	4,75	2,92	61,5	38,5
85°C	360	3,348/77,0	0,04±0,055	5,21	6,13	4,68	76,3	23,7
	405		0,02±0,042	4,03	6,35	4,30	67,7	32,3
	540		0,03±0,133	11,74	5,93	3,88	65,4	34,6

La rétraction du diamètre de ces rondelles, suit celle de l'épaisseur avec à 70 °C, un taux de 34,3 %, quand à celles séchées à 60 et 85 °C, il est moins élevé avec 30,0 % et 32,3 % respectivement.

Il est probable, avec la température 85 °C que le phénomène de durcissement provoqué par la chaleur sur les rondelles constitue le facteur limitant l'évaporation rapide et par conséquent sur la rétraction.

La rétraction se fait dans les deux sens (épaisseur et diamètre), suivant l'allure de la cinétique de séchage, mais de façon plus importante en épaisseur qu'en diamètre. Le durcissement au niveau du périmètre des rondelles limite son rétrécissement.

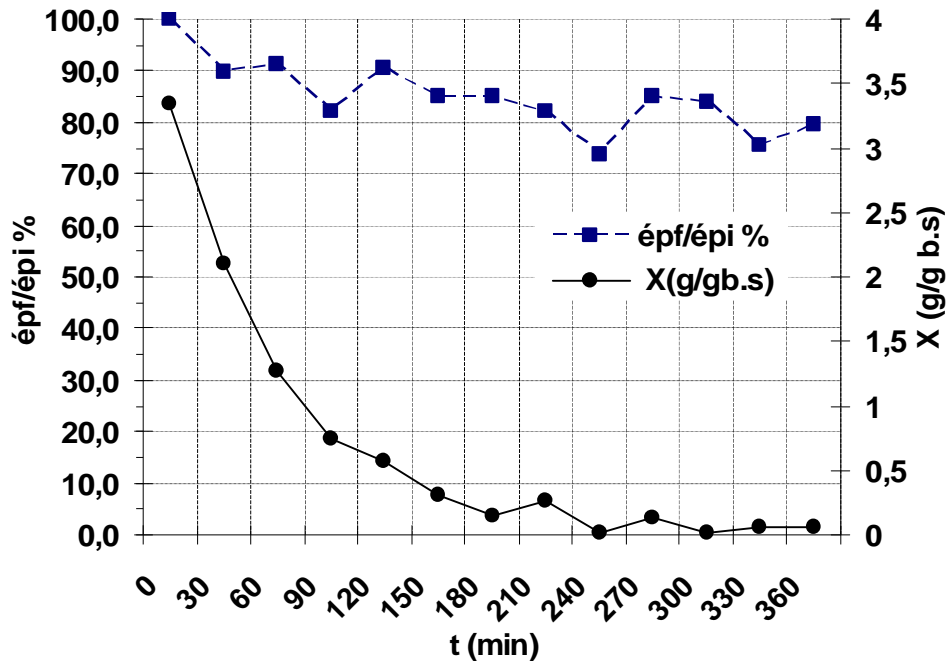


Figure 51 : Evolution du rétrécissement de rondelles de pomme de terre de 6,3 mm séchées à 85 °C

▪ Enfin, les taux de rétraction les plus élevés sont dans l'épaisseur de 12,9 mm pour les températures de 60 °C et 70 °C, avec des pourcentages conséquents, de 74,6 % et 68,0 % respectivement. Au contraire celui de 85 °C est de 55,3 % uniquement.

Ce dernier cas peut s'expliquer par le fait, que l'effet de la température de séchage sur le légume par la formation de croûte suite à l'assèchement des solutés avec un durcissement en surface des rondelles limite le départ de l'eau. La formation du brunissement non enzymatique sur la surface exposée à l'air sec et chaud constituant un frein avec pour conséquence une durée de séchage plus importante (540min) et une teneur en eau supérieure à 10% b.s (13,3 % sur base sèche).

Ces rondelles étant plus épaisses avec un poids plus important (plus d'eau à éliminer), la rétraction du diamètre est plus élevée à 70 °C 38,5 % et à 85 °C 34,6%.

Ceci est dû à la difficulté d'extraire la quantité d'eau permettant d'atteindre des teneurs en eau résiduelles (finales) basses en un temps plus court. La taille des morceaux de découpe limitant le déplacement de l'eau à partir du cœur vers l'extérieur du produit pour son évaporation en fin de séchage.

En fait, BIMBENET et coll. (2002b) rapportent que l'évolution de la structure physique du matériau est directement liée au mode d'évaporation et de transport interne d'eau. Lorsque le transport d'eau a lieu sous forme liquide vers la surface, le produit a tendance à rétrécir proportionnellement au volume d'eau évaporée, dans la mesure où la résistance mécanique du matériau sec le permet.

Cette résistance est remarquée chez les rondelles les plus épaisses de la pomme de terre séchée à 85 °C.

DO AMARAL SOBRAL et coll. (2001), en étudiant l'effet du séchage sur le rétrécissement des cubes de pomme de terre rapportent que le volume des cubes diminuait linéairement avec la teneur en eau pour des pertes inférieures à 80 %.

L'effet de la température sur le taux de rétraction axiale est important sur les rondelles de petite épaisseur où il décroît proportionnellement à la température. Dans le cas de l'épaisseur moyenne, il est moins important puisque à 70 °C, le taux est le plus élevé suivi par celui de 60 °C et le plus bas est celui de 85 °C.

Quand aux rondelles les plus épaisses, l'effet de la température est plus important.

À 85 °C le taux de rétraction est le plus faible par rapport aux deux autres températures, ce qui est dû aux effets de la chaleur qui affecte la qualité du produit. Les deux autres températures agissent moins le produit et donnent des taux de rétraction plus importants.

L'effet de l'épaisseur de découpe sur le taux de rétraction montre, au vu du comportement des rondelles séchées à 60 °C, que l'épaisseur moyenne donne un taux de rétraction moindre par rapport à celui des deux autres épaisseurs. La plus petite assure un taux de rétraction plus élevé que celui de l'épaisseur moyenne qui est inférieur à celui de la plus épaisse des découpes.

A 70 °C, l'effet est important, il augmente proportionnellement à la taille de découpe ; la petite épaisseur assure le taux le plus faible suivi par celui de l'épaisseur moyenne et le plus élevé des taux de rétraction est celui de la plus épaisse.

L'effet de l'épaisseur de découpe sur le taux de rétraction axiale est proportionnel à la taille des rondelles séchées à 85 °C où la plus petite épaisseur assure le taux le plus faible suivi par l'épaisseur moyenne et le plus fort taux est assuré par la plus épaisse des découpes.

Ce paramètre montre effet significatif sur le taux de rétraction axiale contrairement à celui de la température.

5-2-2-Changeement de la couleur

Au cours du séchage de la pomme de terre à 60 °C, les rondelles des trois épaisseurs ont présentées une déformation apparente à partir de 1h30min et à 2h les rondelles durcissent en surface. A partir de 2h30min le brunissement commence à apparaître et s'accroît au bout de 3h jusqu'à la fin du séchage.

Les rondelles les plus épaisses brunissent plutôt que les moins épaisses, et subissent le durcissement avec croûtage en surface qui s'accroît au fur et à mesure de l'évolution du séchage en fonction du temps et de la teneur en eau .

Le séchage de la Pomme de terre à 70 °C, montre un léger dessèchement en surface au bout de 1h30min. À 2h30min une légère déformation est observée avec le dessèchement en surface et une légère brillance.

À partir de 3h à 4h, un durcissement s'ajoute aux autres changements. Enfin de 4h30min jusqu'à 7 et 8h de séchage, l'ensemble des rondelles brunissent en plus du rétrécissement, durcissement et déformation.

Le séchage à 85°C montre une légère déformation des rondelles à partir de 1h30min avec un dessèchement en surface, de couleur jaune et peu tendre. Un léger brunissement des rondelles à partir de 2h30min s'ajoute à la déformation.

Les rondelles deviennent transparentes à partir de 3h de séchage. Le périmètre des rondelles bruni à partir de 3h30 min avec une transparence au centre. La déformation et durcissement s'installent à partir de 4h de séchage. Enfin au-delà de ce temps (4h30min) les rondelles rétrécissent, se déforment et brunissent avec durcissement en surface jusqu'à la fin du séchage respectif à chaque épaisseur.

DO AMARAL SOBRAL et coll. (2001) dans leur étude de l'effet du séchage sur le rétrécissement de cubes de pomme de terre, où la conduite du séchage est en continu avec les températures sont de 40; 60; 80; 90; 100 °C. Les tubercules de pomme de terre ont été coupés en cubes de 9,5mm d'arêtes, et mis en monocouches sur le plateau de séchage. Les échantillons prélevés au cours du séchage sont immédiatement mis dans des sacs de polyéthylène, thermo soudés et gardés en chambre froide à 4 °C.

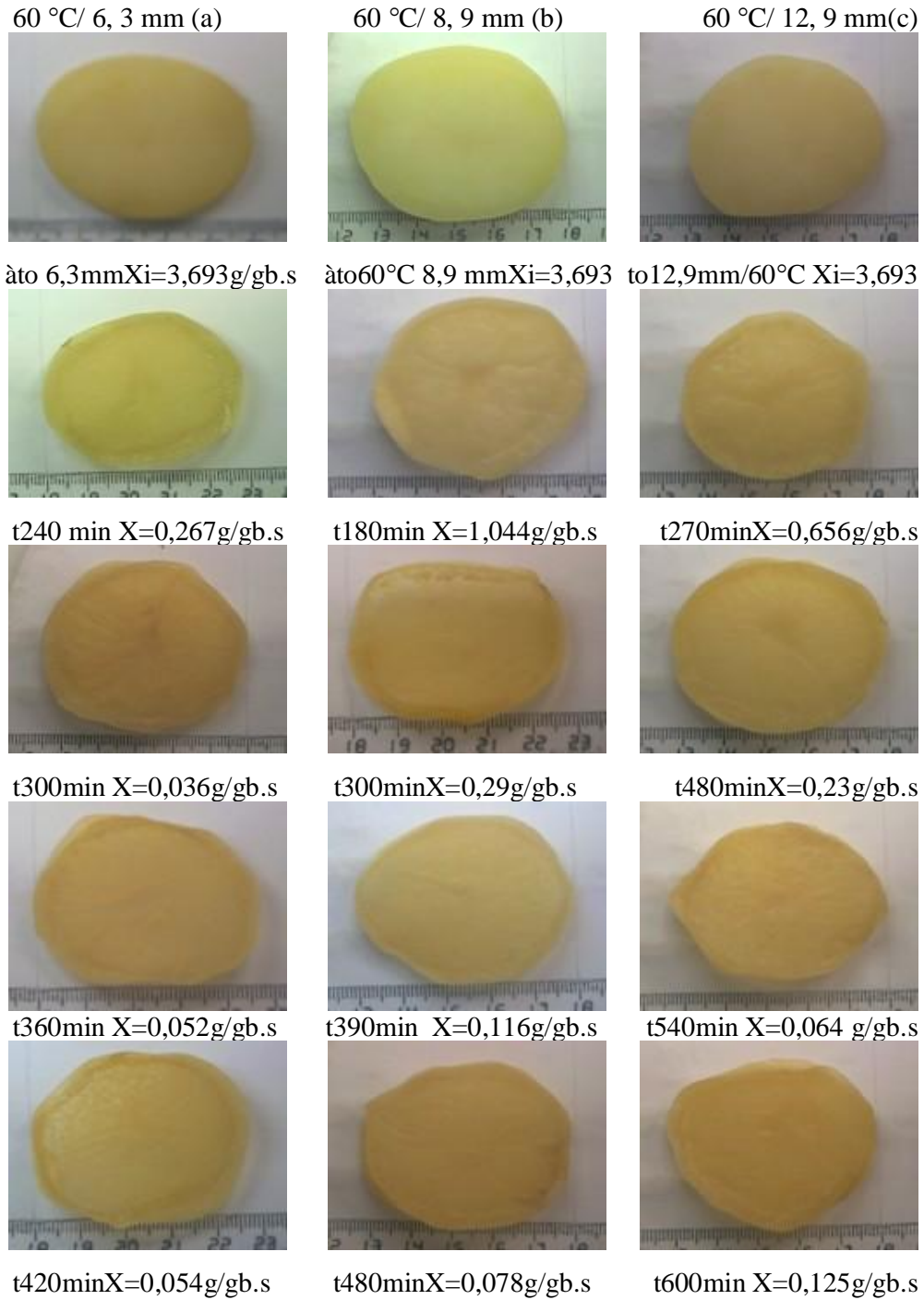


Figure 52: Prises de vue de changement de forme et de couleur de rondelles de pomme de terre de 6,3 (a) ; 8,9 (b) et 12,9 mm (c) d'épaisseur ,séchées à 60 °C

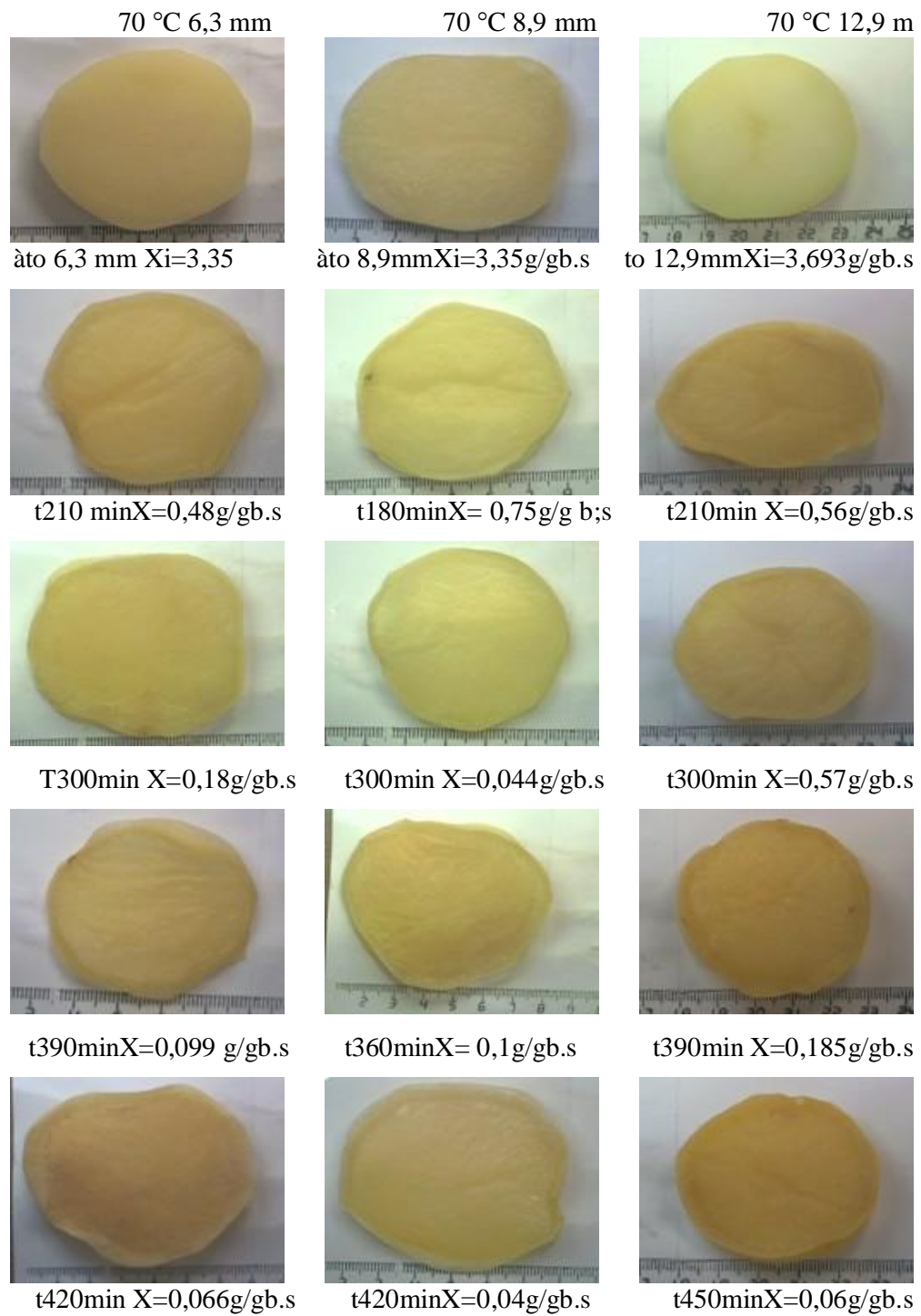


Figure 53: Prises de vue de changement de forme et de couleur de rondelles de pomme de terre de 6,3 (a) ; 8,9 (b) et 12,9 mm (c) d'épaisseur ,séchées à 70 °C

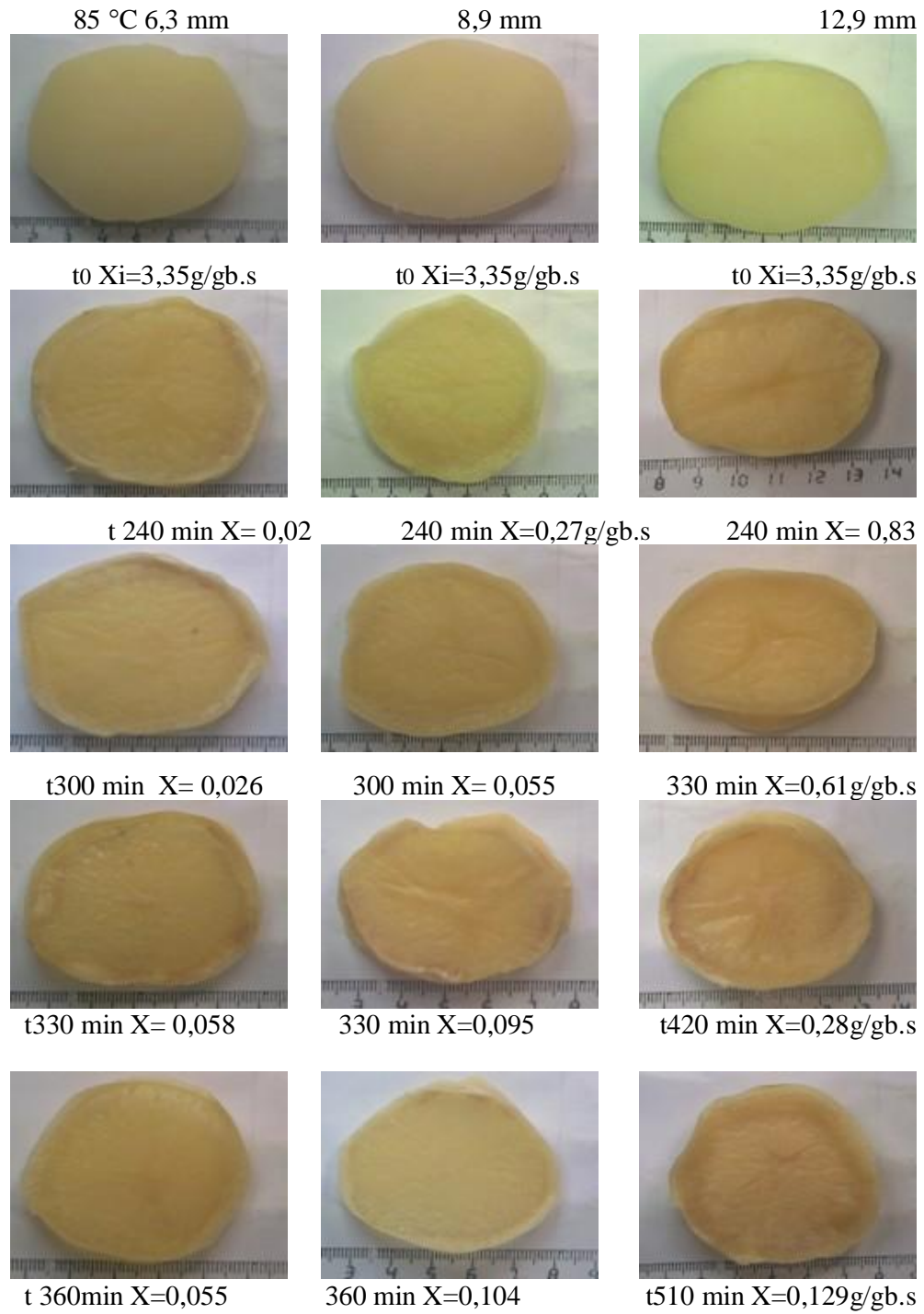


Figure 54: Prises de vue de changement de forme et de couleur de rondelles de pomme de terre de 6,3 (a) ; 8,9 (b) et 12,9 mm (c) d'épaisseur ,séchées à 85 °C

Les auteurs remarquent qu'aucun effet des conditions de séchage n'apparaît sur le rétrécissement des cubes de pomme de terre, et que le volume des échantillons diminue de façon linéaire avec la teneur en eau du produit en début de séchage (80 % de perte d'eau).

Lors du séchage, quand le produit perd de l'eau, la matrice du produit rétrécit pour occuper le volume d'eau perdue.

À basse teneur en eau la structure cellulaire perd par rigidification, sa capacité de rétraction; ce phénomène dépend des conditions de séchage; cas du séchage rapide.

Dans le cas de nos échantillons, il est remarqué que les rondelles séchées à 60 °C rétrécissent plus que celles séchées à 70 °C. Les rondelles séchées à 85 °C, ont présenté une durée de séchage plus courte avec un taux de rétraction plus bas du au durcissement de leur surface limitant la diminution de leur taille. Nos observations sont confortées par ce qui est rapporté par DO AMARAL SOBRAL et coll. (2001).

5-3- Réhydratation de la pomme de terre séché

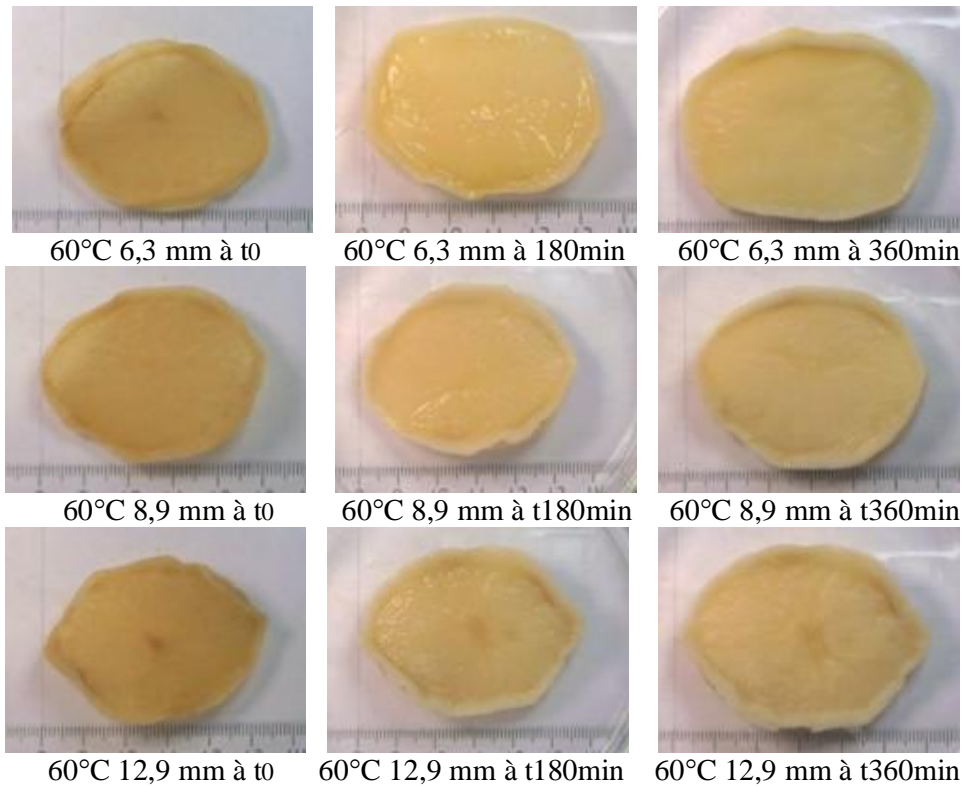
L'évolution de l'absorption d'eau des rondelles de pomme de terre transformée en teneurs en eau absorbées et exprimées en taux de réhydratation par rapport à la teneur en eau initiale ($X_i=3,693$ et $3,348$ g d'eau/g de m.s soit $x_i= 78,69\%$ et $77,0 \%$ b.h). Ils sont calculés à partir des teneurs en eau qui évoluent dans le temps, et permettent de tracer les courbes d'évolution de la réhydratation du légume (figures 56 a,b et c). Les teneurs en eau finales des rondelles après séchage et après réhydratation (X_{fsec} , $X_{réh}$, $épf\ séc$, $épf\ réh$), avec leur taux de réhydratation final, sont résumées dans le tableau n° 25.

5-3-1- Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation de la pomme de terre

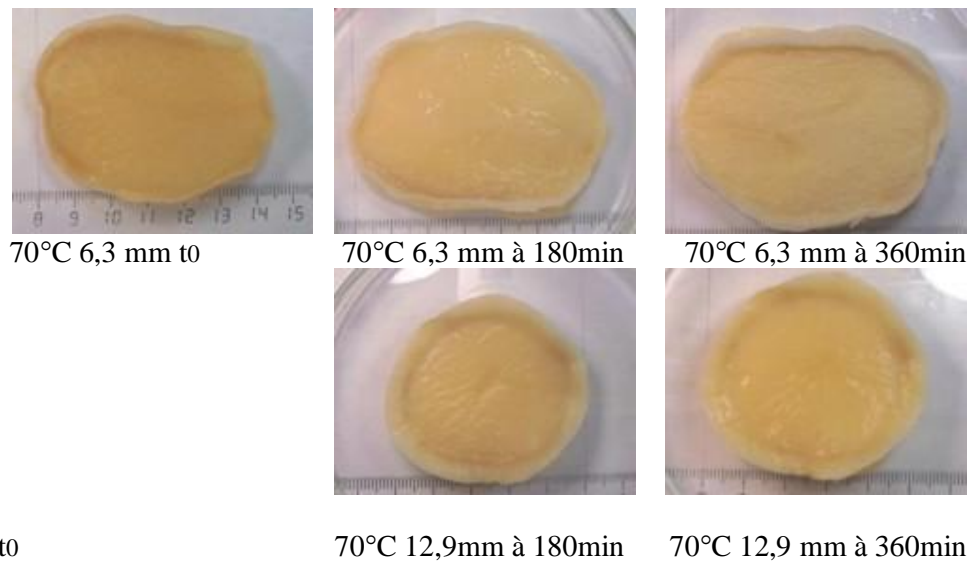
Les allures du taux de réhydratation de chacune des rondelles d'épaisseur 6,3 ; 8,9 et 12,9 mm séchée aux températures 60 ; 70 et 85 °C, sont représentées par les courbes des figures 56 a, b et c qui montrent l'effet de la température de séchage sur leur capacité d'absorption d'eau.

-Sur la figure 56 a, les courbes montrent que l'évolution de la réhydratation de la rondelle de 6,3 mm, est différente pour chaque température. Le taux de réhydratation le plus élevé est obtenu à 85°C avec 42,4 % suivi de celle de 70 °C avec 38,4 % et celle de 60 °C présente le

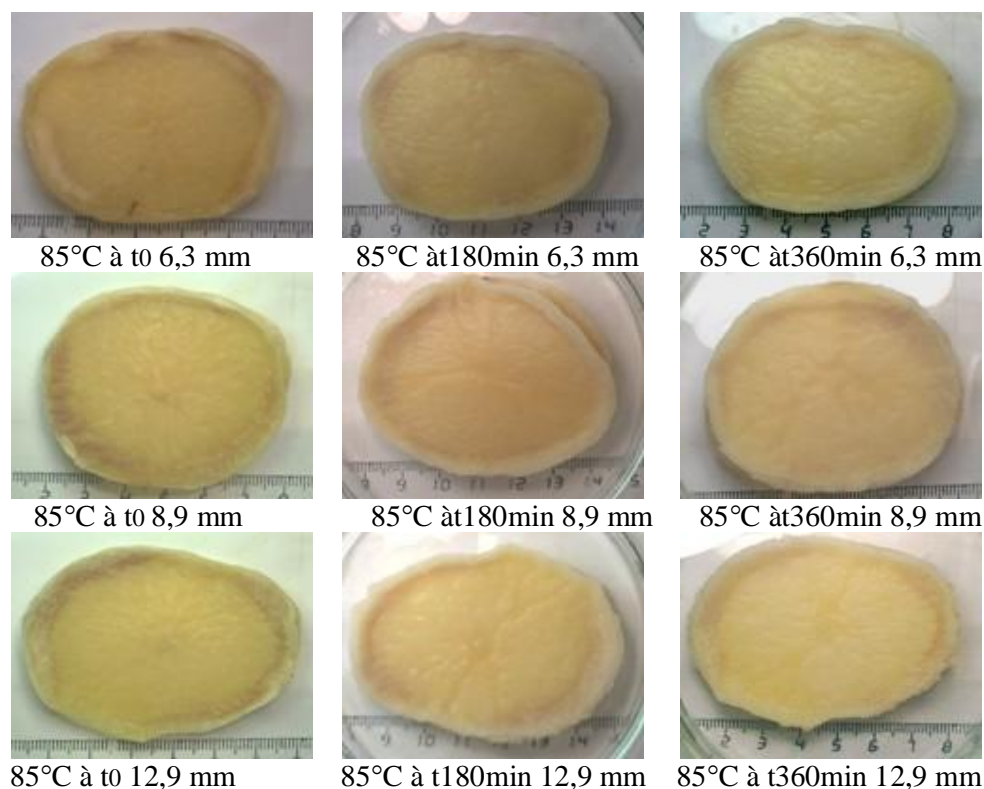
plus faible taux de réhydratation avec 25,8 %. Dans ce cas l'effet de la température est apparent.



a -Réhydratation de rondelles séchées à 60 °C(épi 6,3 ;8,9 et 12,9 mm)



b -Réhydratation de rondelles séchées à 70 °C (épi 6,3 ; 8,9 et 12,9 mm)



c -Réhydratation de rondelles séchées à 85 °C (épi 6,3 ;8,9 et 12,9 mm)

Figure 55: Prises de vue de l'évolution de la réhydratation de rondelles de pomme de terre de 6,3 (a) ; 8,9 (b) et 12,9 mm (c) d'épaisseur ,séchées à 60 (a),70 (b) et 85 °C (c)

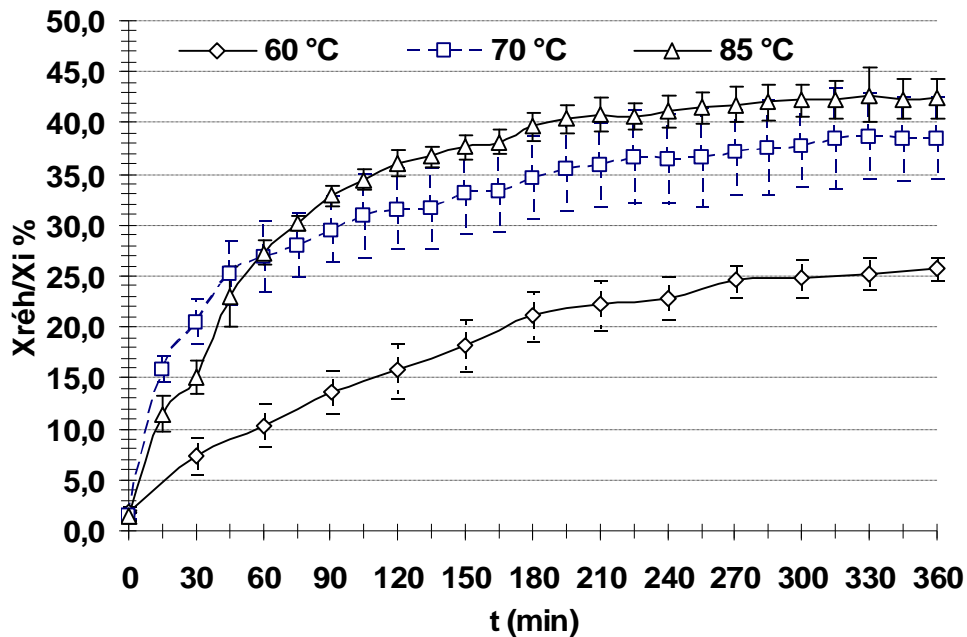
Tableau 25 : Taux de Réhydratation (TR) de la pomme de terre (à 27±1°C) en fonction de la température de séchage et de la taille de découpe.

T° de séchage	Xi b.s	épi de découpe (mm)	temps de séchage (min)	mmoy.de 3 rondelles sèches (g)	ép f sec (mm)	X f séché (g/g)	Xréh (g/g)	TR= Xréh/Xi*100 (%)
60°C	3,693	6,3±0,4	300	2,55±0,30	2,34	0,063	0,95	25,8±1,1
		8,9±0,3	360	3,86±0,18	3,43	0,090	0,75	20,2±4,5
		12,9±0,3	420	3,93±0,21	3,30	0,052	0,70	18,9±1,5
70°C	3,348	6,3±0,4	240	3,17±0,12	2,43	0,030	1,29	38,4±4,1
		8,9±0,3	330	5,64±0,22	3,27	0,021	0,93	27,7±3,1
	3,693	12,9±0,3	420	3,35±0,07	4,00	0,033	0,84	22,7±1,1
85°C	3,348	6,3±0,4	240	3,08±0,21	4,43	0,046	1,42	42,4±1,9
		8,9±0,3	250	4,04±0,52	5,67	0,068	0,92	27,4±3,3
		12,9±0,3	510	6,96±0,55	5,87	0,076	0,94	28,2±3,7

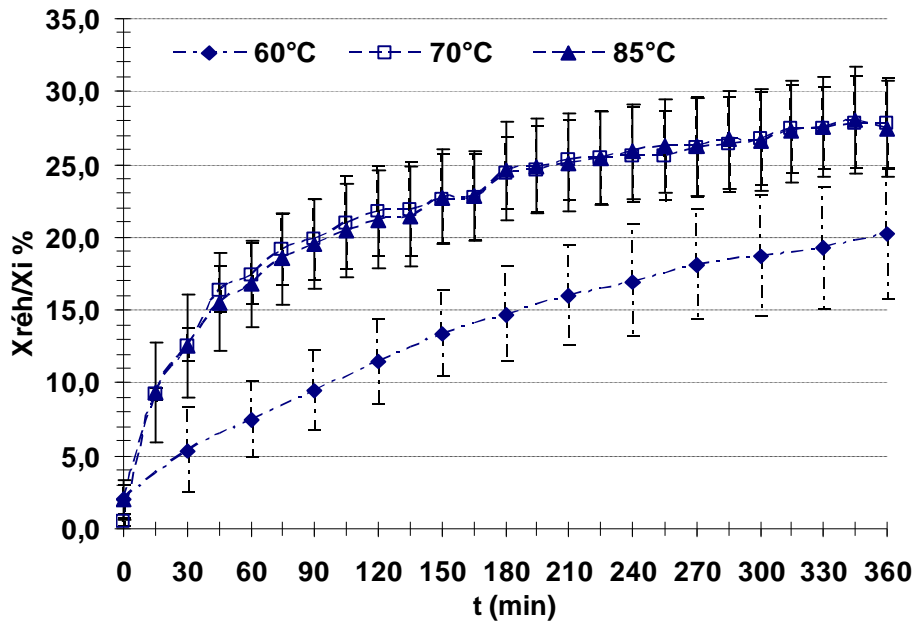
- La figure 56 b de l'épaisseur 8,9 mm, montre une influence moins significative de la température de séchage sur l'évolution des courbes obtenues avec les trois températures. Le taux de réhydratation de 70 et 85 °C avec 27,7 et 27,4 % est supérieur à celui de 60°C qui donne le plus faible des taux 20,2 %.

L'effet observé sur la figure 56 c est significatif avec l'épaisseur de 12,9 mm ; à 85°C le taux de réhydratation est le plus élevé avec 28,2 % suivi par la courbe de celle séchée à 70°C qui donne un taux de 22,7 % et enfin le plus faible est celui de 60°C avec 18,9 % seulement.

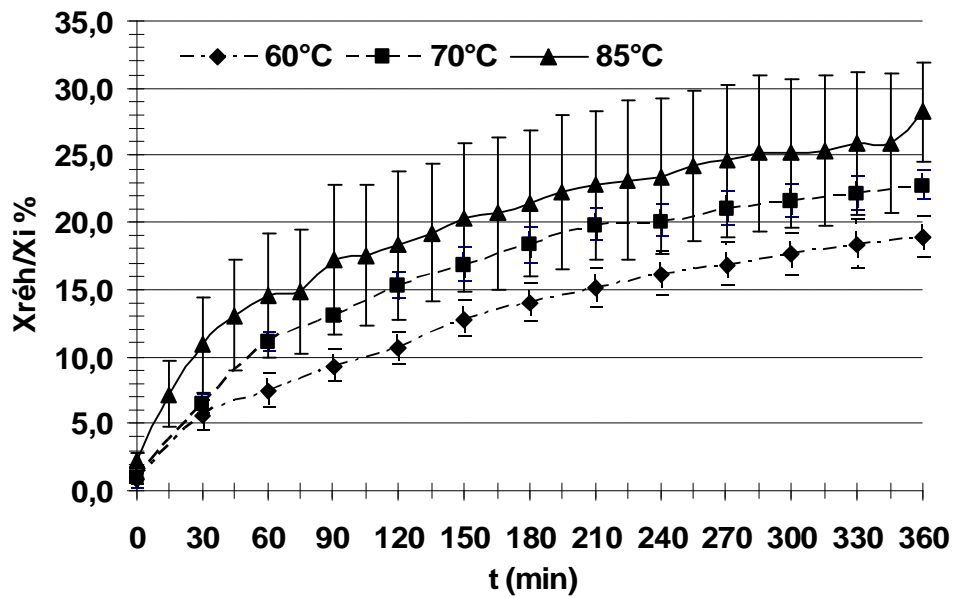
Ces observations nous amènent à dire que probablement l'effet de la température sur le composant essentiel de la pomme de terre ; à savoir l'amidon aurait subi une transformation freinant ainsi la capacité d'absorption de l'eau. La gélatinisation est l'un des phénomènes qui limitent la prise d'eau. L'amidon étant connu pour son pouvoir absorbant élevé, n'apparaît pas dans le cas de nos rondelles et d'ailleurs les plus faibles taux de réhydratation sont obtenus avec la pomme de terre en comparaison avec les autres produits que nous avons séché.



a : Effet de la température sur la capacité de réhydratation de rondelles de pomme de terre de 6,3 mm d'épaisseur



b : Effet de la température sur la capacité de réhydratation de rondelles de pomme de terre de 8,9 mm d'épaisseur



c : Effet de la température sur la capacité de réhydratation de rondelles de pomme de terre de 12,9 mm d'épaisseur

Figure 56: Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation de rondelles de pomme de terre séchées de 6,3 (a) ; 8,9 (b) et 12,9 mm (c) d'épaisseur et réhydratées à l'eau distillée à température

Il est probable qu'avec 60°C, la durée d'exposition au cours du séchage aurait pu provoquer la gélatinisation, ainsi qu'avec 85°C, étant une température relativement élevée elle aurait provoqué le même phénomène, par rapport à 70°C dont la durée de séjour n'est pas assez importante et dont le pourcentage de gélatinisation serait moindre par rapport aux deux autres températures.

En plus des effets mécaniques lors du séchage sur les propriétés de structure, le brunissement et le croûtage du aux solutés qui accompagnent l'eau au cours de la première sous période de séchage avec éventuelle obstruction des pores, dont les conséquences sont un durcissement qui a été observé et remarqué sur les rondelles de pomme de terre ; tous ces aspects ralentissent et constituent des facteurs limitants la réhydratation.

Les transformations que peut subir ce produit amidonné ont été rapportées par la littérature. Pour ce qui est de la porosité selon SARAVACOS (1995); le produit amidonné humide ($X > 1$ b.s) a une petite porosité qui augmente considérablement durant le séchage, particulièrement dans le cas de granules. La porosité de ces derniers atteint les environs de 0,45, quand à l'échantillon gélatinisé séché ayant une structure plus compacte avec une porosité inférieure à 0,1. Ceci dit, la porosité de nos échantillons serait faible, inhibant la capacité d'absorption LESCANO (1983), lors du séchage à l'air chaud de la pomme de terre, rapporte que la gélatinisation de la fécule affecte les isothermes d'absorption de l'eau et ralentit le taux de séchage, comparativement aux pommes de terre crues. Le tracé des isothermes d'absorption pour les tubercules crus et cuits, montre la différence sensible entre le produit séché et non séché. La différence entre la pomme de terre cuite (à la vapeur) et les crues s'explique par la gélatinisation des granules de féculs et les modifications de la structure physique consécutives à la cuisson .

5-3-2- Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de pomme de terre

L'effet de l'épaisseur sur le taux de réhydratation est aussi important que celui de la température, ce qui est montré dans les figures 57 a ,b et c par les courbes d'évolution de la réhydratation des rondelles des trois épaisseurs séchées à chacune des températures 60 ;70 ou 85 °C .

Il apparaît que la dimension du légume séché a une influence significative sur l'allure de la réhydratation. Les courbes sont bien distinctes d'une épaisseur à une autre et ont données des taux de réhydratations différents.

-Les rondelles de la petite épaisseur (6,3 mm) sont celles qui ont données les taux de réhydratation les plus élevés de 25,8 % à 60 °C (figure 57a), suivies par celles de 8,9 mm avec 20,2 % et le plus faible est celui des rondelles de 12,9 mm avec 18,9 %.

-Les rondelles séchées à 70 °C (figure 57 b) montrent un effet assez significatif par une évolution des courbes bien distinctes et séparées l'une de l'autre. Le taux le plus élevé est obtenu par l'épaisseur de 6,3 mm avec 38,4 %, suivi par les rondelles de 8,9 mm avec 27,7 % et le plus faible est celui de 12,9 mm avec 22,7 %.

-Les rondelles séchées à 85 °C (figure 57 c) montrent une différence dans leur évolution avec un taux de réhydratation le plus élevé 42,4 % obtenu par l'épaisseur 6,3 mm ,suivi par celui des deux autres épaisseurs 8,9 et 12,9 respectivement 27,4 et 28,2 %.

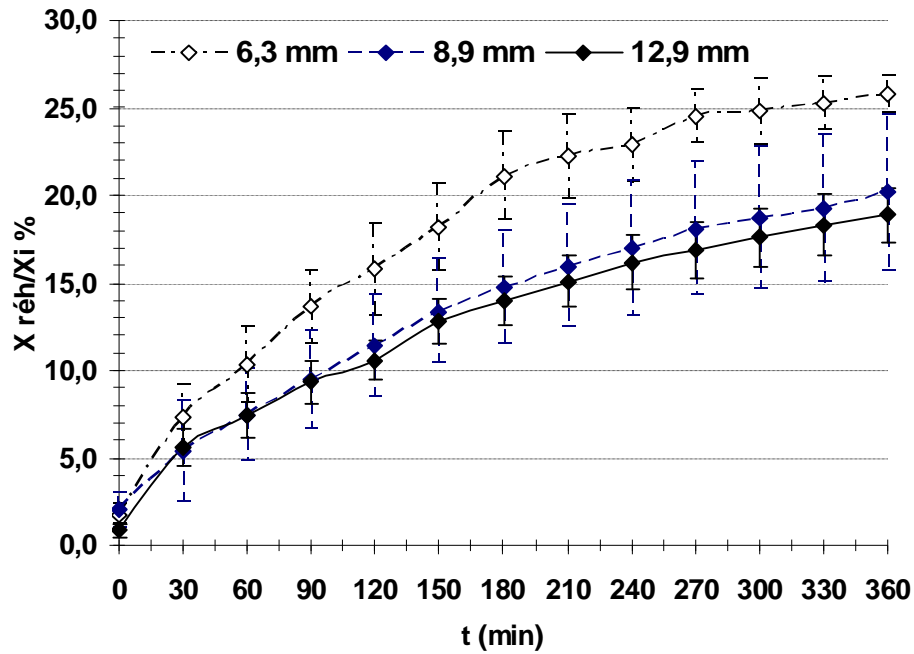
Le comportement de ces dernières rondelles étant plus épaisses, elles ont subi un durcissement et brunissement en surface assez importants qui auraient limité la capacité de réhydratation et donner un niveau d'absorption similaire.

Dans tout les cas de figure, l'épaisseur la plus faible a donné les taux de réhydratation les plus élevés, suivi de celle de 8,9 mm et enfin les faibles taux de réhydratations sont ceux de 12,9 mm qui parait la moins intéressante des trois épaisseurs.

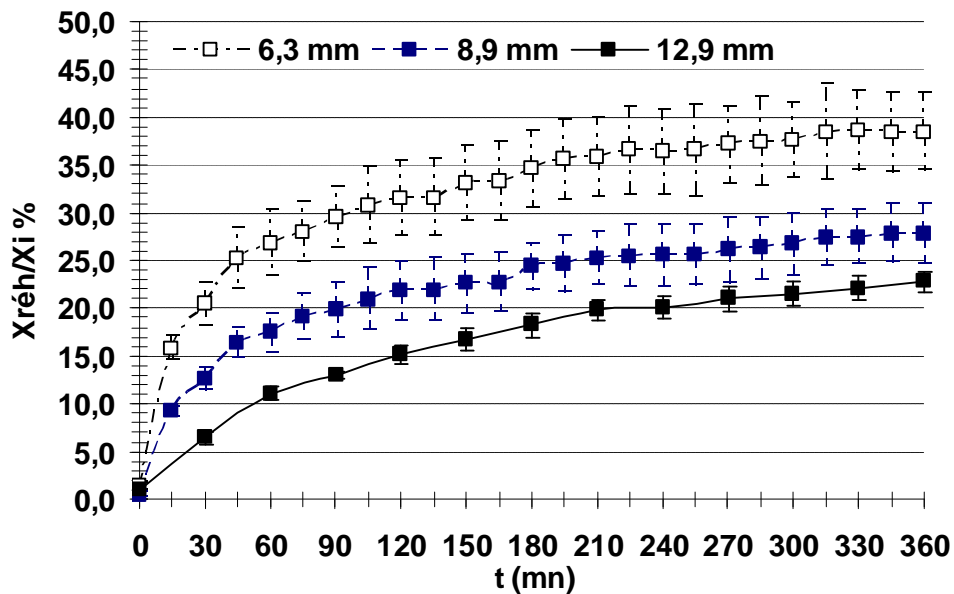
L'effet de l'épaisseur est très significatif dans la mesure où la plus petite épaisseur (6,3 mm) assure les taux de réhydratation les plus élevés par rapport à celle qui lui est supérieure (8,9 mm) .Cette dernière assure des taux plus élevés que l'épaisseur la plus large (12,9 mm).

Les courbes de réhydratation évoluent distinctement l'une de l'autre pour les températures de séchage de 60 et 70°C malgré des écarts type assez importants (cas de l'épaisseur 8,9 mm à 60 °C). À 85 °C l'effet est moins significatif surtout pour les épaisseurs de 8,9 et 12,9 mm. Ceci nous amène à dire que l'effet de la température de séchage sur le taux de réhydratation est important du point de vue altération de la structure du produit.

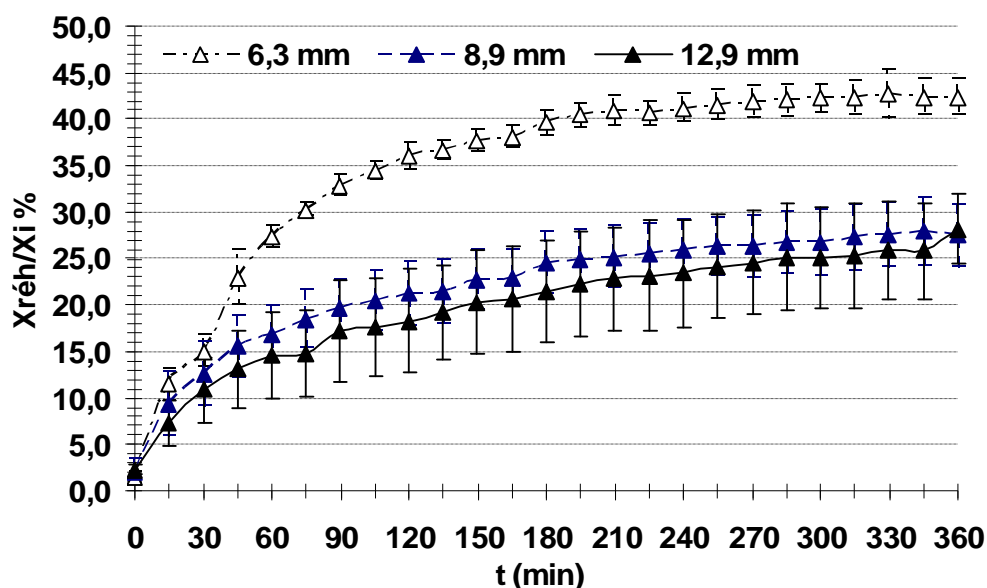
En séchage classique par air chaud, selon JAYARAMAN et DAS GUPTA (1995) cités par BIMBENET et coll. (2002b) les séchages les plus rapide conduisent aux meilleures réhydratations et dans tous les cas, le taux de réhydratation est en bonne partie lié à la dénaturation des protéines, qui est fonction des couples temps températures atteints pendant le séchage.



a : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de rondelles de pomme de terre séchées à 60 °C



b : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de rondelles de pomme de terre séchées à 70 °C



c : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de rondelles de pomme de terre séchées à 85 °C

Figure 57: Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de rondelles de pomme de terre séchées à 60 (a) ; 70 (b) et 85 °C (c) à l'eau distillée à température ambiante

DO AMARAL SOBRAL et coll. (2001) pensent que les effets dus aux caractéristiques mécaniques du produit dépendent des conditions de haute température, le séchage étant plus rapide, les gradients internes de teneur en eau sont plus élevés, la surface est plus sèche, donc plus rapide que dans les conditions de séchage lent.

Cette surface est moins capable de se déformer pour accompagner la réduction de volume interne due à la perte d'eau. Donc la rigidification de la surface du produit entraîne l'apparition d'une porosité, elle est d'autant plus importante que la température et la vitesse de l'air entraînent un séchage plus rapide.

Ces constatations sont observées chez nos rondelles de pomme de terre séchées à 85 °C qui ont moins rétréci et assurées le taux de réhydratation le plus élevé.

La dénaturation des protéines est probablement importante dans la pomme de terre (dont la teneur n'est pas assez importante, de 2,04 g/100g selon SOUCI et coll. (1994) ; et 2,1 g / 100g crue et 1,5 g/100g cuite selon FAVIER et coll. (1995) par rapport aux glucides) vu les modifications de structure et d'aspect des rondelles au cours du séchage.

Dans le cas de nos échantillons, la meilleure capacité de réhydratation (42,4 %) est assurée par la température de séchage la plus élevée, avec une durée de séchage de 185 min

(3h05min) et une teneur en eau finale $X_f = 0,046 \text{ g/g b.s}$ (4,4 % b.h). Le plus faible taux de réhydratation est obtenu par la température de séchage de 60°C qui est de 18,9 %, d'une durée de séchage de 420 min (7h) et $X_f=0,052\text{g/g}$ (4,94% b.h).

5-4-Séchage solaire

5-4-1- Performances du séchoir

Le suivi des performances du séchoir confectionné a été effectué pendant au moins trois jours. Les mesures de température de l'air ambiant, à l'entrée du réchauffeur, à l'intérieur de celui-ci et à sa sortie (air destiné à sécher les échantillons) et au niveau de la chambre de séchage ont été notées.

La variation de l'ensoleillement au cours de la journée avec une température moyenne (19 mesures) de l'air frais de $36,4 \pm 4,1 \text{ °C}$, un coefficient de variation de 11 %. Les essais préliminaires ont permis d'enregistrer avec le compartiment collecteur fermé ; des températures maximales allant jusqu'à 76 °C , une moyenne (23 mesures) de $59 \pm 9,9 \text{ °C}$ et un coefficient de variation de 17 % au niveau de la sortie . L'intérieur du collecteur 61 °C est notée avec une moyenne (28 mesures) de $50,4 \pm 6,9 \text{ °C}$ et un coefficient de variation de 14 %.

Le gain en température issue de l'effet de serre et de l'absorption de la chaleur par les deux couches de charbon est visiblement intéressant.

Les variations de température au cours du séchage de la pomme de terre sont noté et présentées dans le tableau 26 ; (a) pour l'épaisseur 5 mm et (b) pour 8 mm.

Tableau 26 : Variation de température de séchage solaire de la pomme de terre et l'oignon

a : Séchage de la pomme de terre et l'oignon de l'épaisseur 5 mm

	t de l'air entrée réchauffeur (°C)	t int. de réch (°C)	t interne réchauffeur (sortie) (°C)	t de chambre (°C)
1 ^{er} jour	38,5	49,7	60	46,5
2 ^{ème} jour	36,6	56,8	64,6	51,6
3 ^{ème} jour	39	51	57	41,5
t moy±écart type	38,0±1,0	52,5±3,1	60,5±3,1	46,5±4,1

b : Séchage de la pomme de terre et l'oignon de l'épaisseur 8 mm

	t de l'air entrée réchauffeur (°C)	t int. de réch (°C)	tinterne réchauffeur (sortie)(°C)	t de chambre (°C)
1 ^{er} jour	33,2	50,2	57,6	45,6
2 ^{ème} jour	32	50,6	56,2	44,6
3 ^{ème} jour	37,4	51	58,4	52
4 ^{ème} jour	31,2	43,6	45,8	39,6
t moy±écart type	33,5±2,4	48,9±3,0	54,5±5,1	45,5±4,4

5-4-2- Cinétique de séchage

L'évolution de la cinétique de séchage des rondelles de pomme de terre coupées en 5,0 et 8,0 mm d'épaisseur est présentée par la figure 58.

Les courbes expérimentales sont lissées manuellement en Δt de 30 min (figure 58 a) pour permettre la transformation de l'évolution de la teneur en eau en vitesse de séchage en fonction du temps moyen (figure 58 b) et en fonction de la teneur en eau moyenne (figure 58c).

Les échantillons de pomme de terre de 5,0 mm d'épaisseur ont été séché en deux jours et celles de 8,0 mm en trois jours avec une durée de séchage de cinq heures par jour (figure 58 a).

Cependant, en fin de chaque journée de séchage les échantillons ont été placé dans un dessiccateur pendant la nuit (19 heures) où nous avons noté une variation de masse et donc perte d'humidité.

Cette perte est en moyenne ΔX 0,763 g/g b.s soit 43,3 % sur base humide pour l'épaisseur 5 mm. Elle est de ΔX 0,39 g/g b.s (1^{ère} nuit entre la 5^{ème} et la 6^{ème} heure) et 0,2 g/g b.s (2^{ème} nuit entre la 13^{ème} et 14^{ème} heure), soit en totalité 0,59 g/g b.s (37,11% sur base humide) pour l'épaisseur 8mm.

Les vitesses de séchage initiales au tmi 15 min sont de 0,69 et 0,59 g/g m.s/h pour les deux épaisseurs 5 et 8 mm.

Les rondelles de 5 mm d'épaisseur sont séchées au bout d'un Δt de 11 heures (deux jours) avec ΔX totale de 3,56 g/g b.s soit 78,07 % b.h. La variation de la teneur en eau en 5 heures de séchage du 1^{er} jour est de 2,79 g/g b.s (73,61 % b.h). la deuxième journée de séchage avec

Δt 6 h , ΔX est 0,34 g/g b.s (25,37 % b.h) jusqu'à la teneur en eau finale X_f de 0,109 g/g b.s soit 9,83 % sur base humide.

Les rondelles de 8 mm d'épaisseur sont séchées en un Δt de 16 heures (trois jours) avec ΔX totale 3,57 g/g b.s soit 78,12 % b.h. La variation de la teneur en eau en 5 heures de séchage du 1^{er} jour est de 1,923 g/g b.s (65,79 % b.h). La deuxième journée de séchage avec Δt 7 h, ΔX est de 1,157 b.s (53,64 % b.h)

Le troisième jour de séchage de cette dernière, il a été évaporé 0,094 g/g b.s (8,6 % b.h) en un Δt de 2h jusqu'à la teneur en eau finale X_f de 0,106 g/g b.s soit 9,58 % sur base humide.

L'allure générale des courbes de cinétique et de vitesse de séchage montre que le séchage se déroule en phase de vitesse décroissante et l'absence de phase constante et de mise en température. Cette phase décroissante montre qu'il est possible de subdiviser en .sous phases

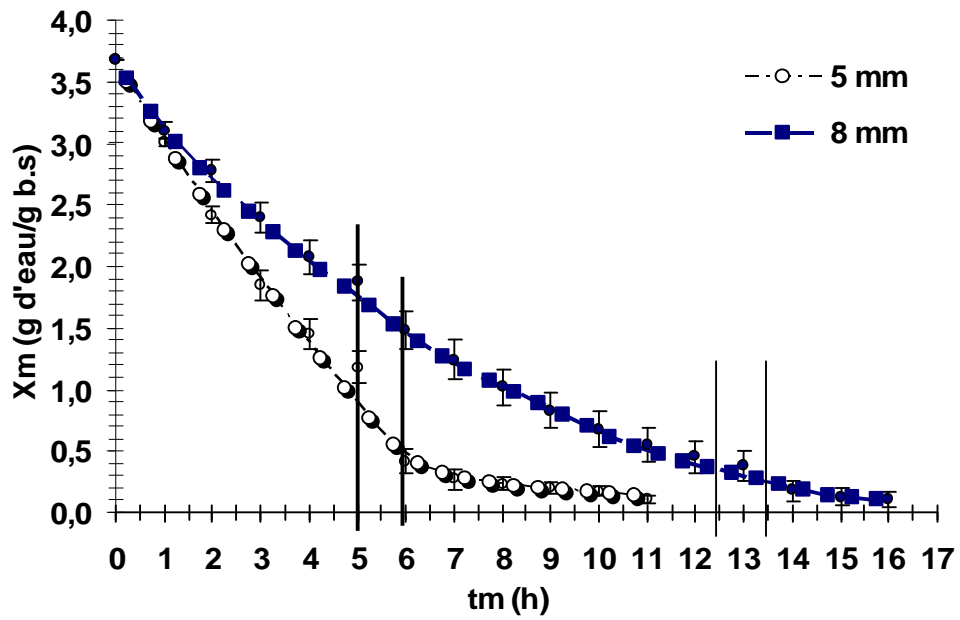
Les figures 58 b et 58 c montrent des points d'inflexions où le changement de pente est illustré par une variation de l'évolution de la vitesse de séchage en deux sous phases.

Une première sous phase pour l'épaisseur de 5 mm , à décroissance rapide jusqu'à X_m de 0,77 g/g b.s (43,5 % b.h) correspondant à Δt_1 de 5h 15 min (315 min) et ΔX_m 2,73 g/g b.s soit 73,19 % b.h.

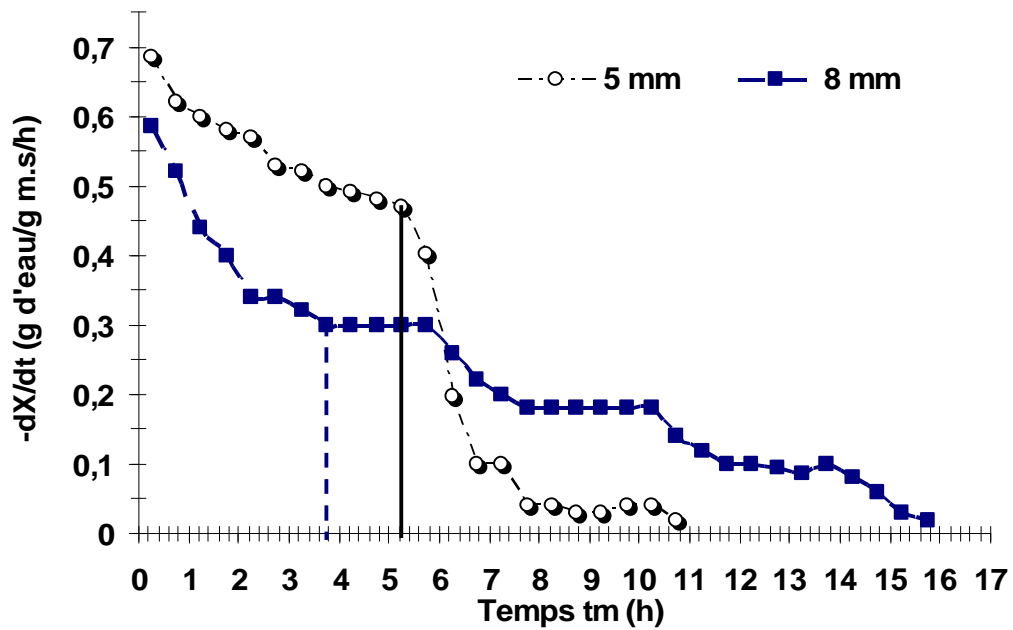
La deuxième sous phase de décroissance ralentie jusqu'à la teneur en eau finale X_f 0,109 b.s (9,83 % sur base humide) correspond à ΔX_{mf} 2,8 g/g b.s soit 73,68 % sur base humide. Le Δt_2 de 5 h 45 min (345 min) correspond 52,3 % de la durée totale du séchage.

Une première sous phase pour l'épaisseur de 8 mm , à décroissance rapide jusqu'à X_m de 2,13 g/g b.s (68,05 % b.h) correspondant à Δt_1 de 3h 45 min (225 min) et ΔX_m 1,40 g/g b.s soit 58,33 % b.h.

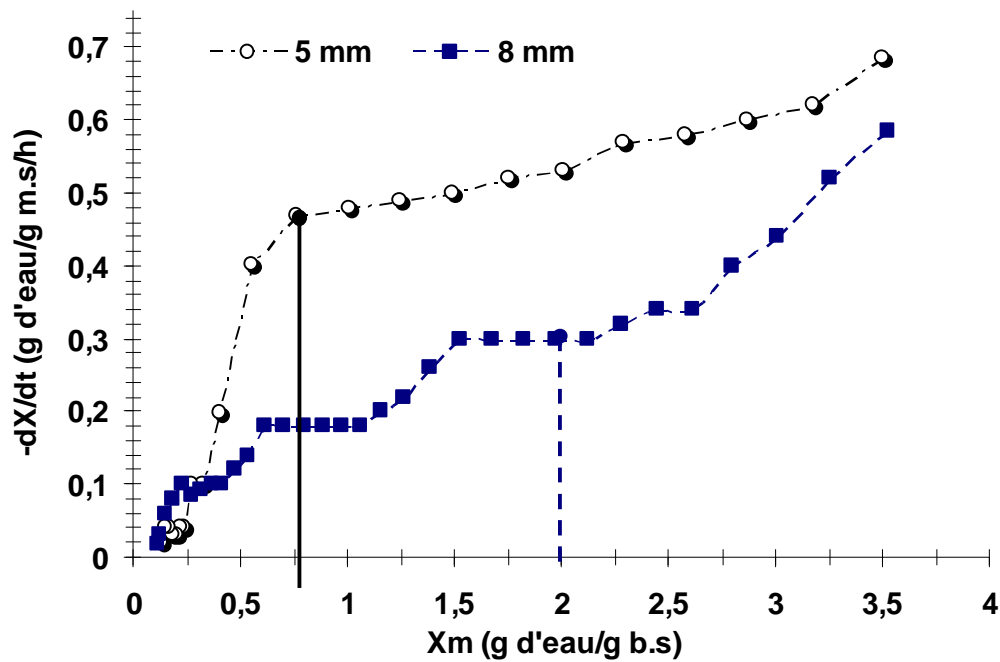
La deuxième sous phase de décroissance ralentie jusqu'à la teneur en eau finale X_f 0,106 b.s (9,58 % sur base humide) correspond à ΔX_{mf} 1,44 g/g b.s soit 59,02 % sur base humide. Le Δt_2 de 12 h 15 min (735 min) correspond 76,6 % de la durée totale du séchage. Cette deuxième phase assez longue se présente en forme de palier montrant la difficulté d'évaporer la quantité d'eau restante due à l'épaisseur des rondelles.



a : Cinétique de séchage solaire de rondelles de pomme de terre ; $X_m=f(t_m)$



b : Vitesse de séchage solaire de rondelles de pomme de terre ; $-dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage solaire de rondelles de pomme de terre ; $-dX/dt = f(Xm)$.

Figure 58 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage des rondelles de pomme de terre de 5,0 et 8,0 mm d'épaisseur ;(a) $Xm = f(tm)$; (b) $-dX/dt = f(tm)$ et (c) $-dX/dt = f(Xm)$

5-4-3- Discussion et conclusion

Malgré une légère différence de température de séchage des deux épaisseurs (60,5 °C pour 5 et 54,5 °C pour 8mm), l'effet de l'épaisseur est très significatif.

Les deux rondelles démarrent à des vitesses de séchage initiales différentes avec des teneurs en eau X_{mi} à 15 min où celle de 5 mm est plus faible 3,5 g/g b.s (77,78 % b.h) que celle de 8 mm 3,53 g/g b.s (77,92 % b.h).

La teneur en eau finale est approximativement la même pour une durée totale de séchage plus courte pour la petite épaisseur (11h) que celle de la plus épaisse (16 h).

Les points d'inflexions montrent une première sous phase relative à l'évaporation de l'eau faiblement liée (capillaire) avec une quantité éliminée plus élevée avec 5 mm que celle de 8 mm.

La deuxième sous phase est plus longue avec diminution de la vitesse de séchage à 8 mm qu'avec 5 mm et la quantité d'eau évaporée est plus importante chez la petite épaisseur que

celle de la plus épaisse .Elle correspond à l'élimination de l'eau de plus en plus liée qui est difficile à extraire.

Nous pouvons conclure que l'épaisseur de 5 mm est plus intéressante à sécher dans ce type de séchoir solaire dont les performances peuvent être amélioré.

6 - Séchage et comportement de l'ail

6-1- Cinétique de séchage

6-1-1- Effet de la température sur la cinétique de séchage

Le résultat de l'effet de la température de séchage sur la cinétique des vitesses de séchage des tranches d'ail est exprimé par des courbes, montrant l'influence de ce paramètre sur le comportement de chaque tranche en fonction de sa dimension. Les figures 59 a et 60a de la cinétique de séchage $X_m = f(t_m)$ sont présentées en annexe 1.

Les figures 59 (b et c) et 60 (b et c) représentent l'évolution de la vitesse de séchage $dX/dt=f(t_m)$ et $dX/dt=f(X_m)$ de l'ail et montrent l'effet de chaque température de séchage (60 ; 70 et 85°C) sur chacune des deux épaisseurs (5,9±0,3 et 7,8±0,2 mm).

L'allure générale des courbes de cinétique et des vitesses de séchage (figures 59 et 60) montre que le séchage se déroule en phase décroissante en l'absence de la période de mise en température et de la période à allure constante. Ce phénomène a été rapporté en littérature à propos des produits alimentaires, notamment les légumes.

La présence d'une seule phase à allure décroissante montre qu'elle peut être subdivisée en deux sous périodes selon la température de l'air et l'épaisseur des tranches.

►► Sur les figures 59 b et 59 c de l'épaisseur 5,9±0,3 mm, les courbes démarrent au temps initial ($t_{mi} = 5\text{min}$) à des vitesses initiales $(-dX/dt)_i$ de séchage différentes où celle de 60 °C est la plus basse avec 1,83 g d'eau/g m.s/ h correspondant à une teneur en eau initiale X_{mi} de 1,87 g/g b.s (65,16 % b.h), suivie par celle de 70 °C avec 2,10 g d'eau/g m.s/h et une X_{mi} de 1,85 g/g b.s (64,91 % b.h) et enfin la température 85 °C assure la vitesse initiale la plus élevée de 2,25 g/g m.s/h correspondant à X_{mi} de 1,84 g/g b.s (64,79 % b.h).

Au cours du séchage les trois courbes de 60 °C ; 70 °C et 85°C évoluent de façon séparée du début du séchage jusqu'aux basses teneurs en eau. Dans la figure 59 b, il apparaît que les courbes de 70 et 60 °C se croisent au début du séchage à 25 min sans se confondre où l'effet de la température s'atténue jusqu'à $t_m = 45\text{min}$ où l'effet de la température s'accroît. Cette partie montre (figure 59 c) que le séchage se déroule à des vitesses inversées, ensuite la courbe de 70 °C reprend son évolution à des vitesses plus élevées que celle de 60 °C .

L'effet perd de l'influence entre les trois courbes aux environ de teneurs en eau de 0,3 g/g b.s et vitesses de 0,25 g/g m.s/h où elles se confondent jusqu'à la fin du séchage.

► Les courbes de séchage des trois températures montrent qu'à Δt_1 4h 45min (285 min) , les rondelles atteignent la teneur en eau moyenne sur base sèche <10 g/g b.s, $X_{m1}=0,096$ et $0,098$ g/g b.s (8,76 et 8,92 % sur b.h) respectivement à 60 et 70 °C, et 85 °C. Cette durée est suffisante pour éliminer ΔX_{m1} de 1,777; 1,754 et 1,74 g d'eau /g de masse sèche soit 63,99; 63,69 et 63,50 % sur base humide de l'eau contenue dans l'ail.

La teneur en eau moyenne finale est atteinte après 1 h10; 3h 10 min et 1h00 min (70 ; 190 et 60 min) de plus pour éliminer respectivement 5,5 ; 5,4 et 3,2 % b.s (5,21; 5,12 et 3,10 % b.h) d'eau restante de X_{m1} jusqu'à X_{mf} 0,041 ; 0,043 et 0,066 g/g b.s (3,94 ; 4,12 et 6,19 % b.h).

Le temps Δt_t de 5 h55; 7h 55 min et 5h 45 min (355; 475 et 345 min) correspond à l'évaporation de ΔX_{mt} 1,83; 1,809 et 1,772 g d'eau /g de m.s soit 64,66 ; 64,40 et 63,92 % b.h (g d'eau évaporée par 100 g de masse humide) au cours du séchage de ces tranches d'ail de 5,9 mm d'épaisseur.

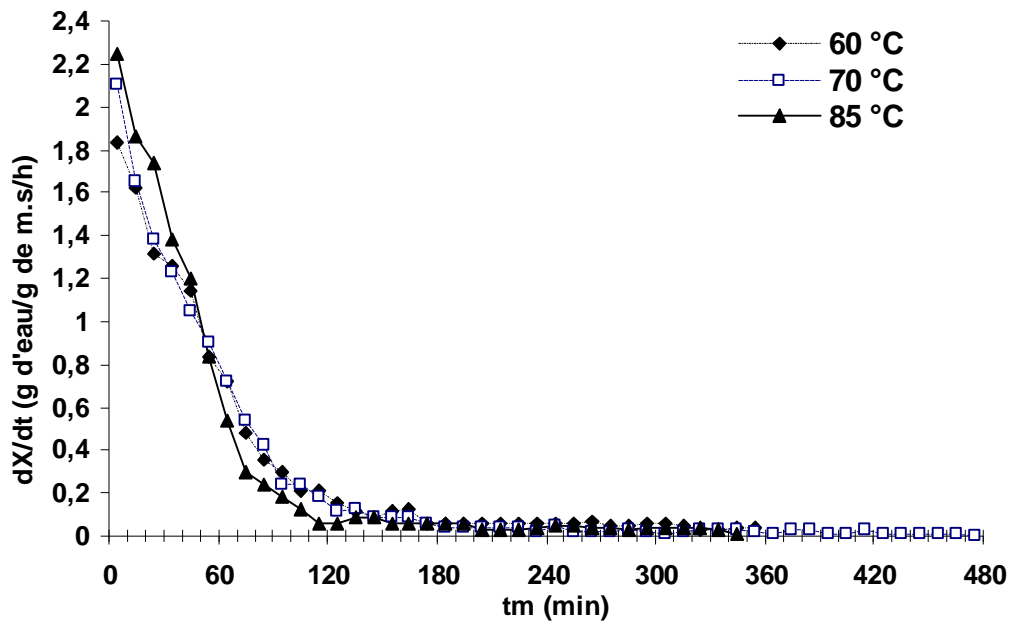
La teneur en eau initiale de l'ail est de 66,94% pour l'épaisseur 5,9 mm séchée à 60 et 85 °C et de 65,67 % à 70 °C .

L'effet de la température trouve son importance dans la durée de séchage respective qui est plus courte à 85 °C que pour les deux autres.

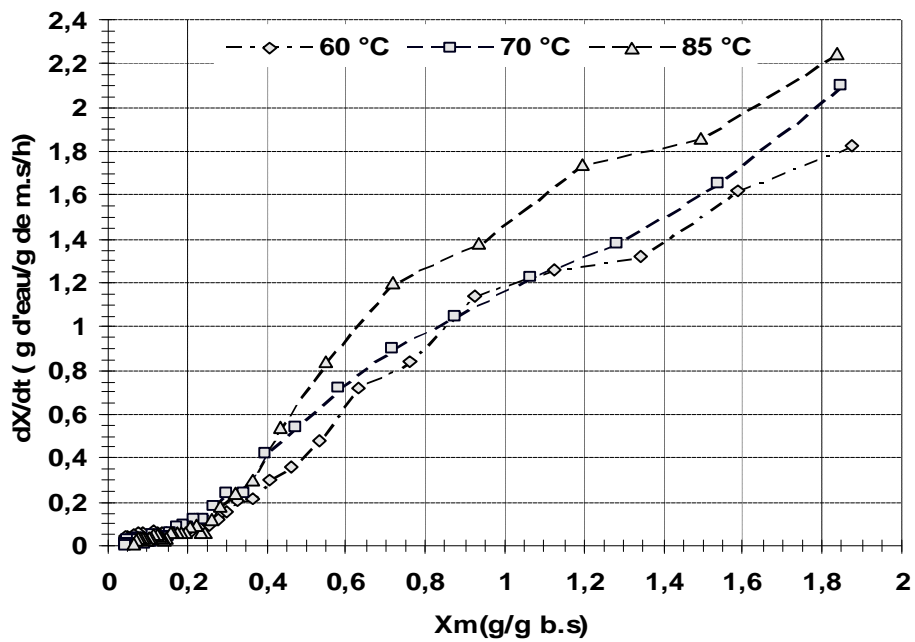
► Le changement de pente est observé (figure 59 b et 59 c) à 45min (60 et 85 °C) et à 55min (70 °C) de séchage, il correspond à X_m de 0,93 et 0,72 g/g b.s (48,19 et 41,86 % b.h) pour 60 °C et 70 et 85 °C ,à une vitesse de 1,14 ; 0,9 et 1,20 g d'eau/g m.s/h respectivement à 60 ,70 et 85 °C. Ces points correspondent à l'évaporation de 0,95; 1,14 et 1,12 g/g b.s soit 48,72 53,27 et 52,83 % sur base humide.

La vitesse de séchage montre une évaporation plus élevée au début avec $(-dX/dt)_i$ élevée jusqu'au point d'inflexion avec changement de l'allure de la courbe et abaissement de la vitesse au fur et à mesure que la teneur en eau résiduelle diminue

La quantité d'eau évaporée à partir du point d'inflexion diminue, ainsi que la faible vitesse à partir de ce changement de pente, nécessite une durée plus longue jusqu'à X_{mf} qui est de 5h 10min (310min) à 60 °C; 7h 00 (420 min) à 70 °C et 5h 00 min (300 min) à 85 °C pour évaporer 47,00 ; 40,44 et 39,54 % sur base humide. Il correspond à 87,3 ; 88,4 et 87,0 % de la durée totale respective (60 et 70 °C, et 85 °C) du séchage.



b : vitesse de séchage de tranches d'ail de 5,9 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de tranches d'ail de 5,9 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(X_m)$.

Figure 59 : Effet de la température de l'air sur la vitesse de séchage des tranches d'ail de 5,9 mm d'épaisseur ; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

►► Sur les figures 60 b et 60 c de l'épaisseur $7.8 \pm 0,2$ mm, les courbes démarrent au temps initial ($t_{mi} = 5$ min) à des vitesses de séchage initiales $(-dX/dt)_i$ différentes où celle de 70°C est la plus élevée $2,0$ g d'eau/g m.s/ h correspondant à une teneur en eau initiale X_{mi} de $1,86$ g/g b.s ($65,03\%$ b.h), suivie par celle de 85°C avec $1,53$ g d'eau/g m.s/h et une X_{mi} de $1,9$ g/g b.s ($65,52\%$ b.h) et enfin la température 60°C a la plus faible vitesse initiale $1,35$ g/g m.s/h correspondant à X_{mi} de $1,91$ g/g b.s ($65,64\%$ b.h).

Au cours du séchage les trois courbes de 60°C ; 70°C et 85°C évoluent de façon séparée du début du séchage et se chevauchent à des niveaux de teneurs en eau d'environ $1,10$ g/g b.s où celle de 70°C qui évolue avec une vitesse plus élevée , décroît rapidement mais celle de 85°C assure une vitesse plus élevée montrant l'effet de la température jusqu'au point de rencontre des trois courbes à des teneurs en eau plus basses.

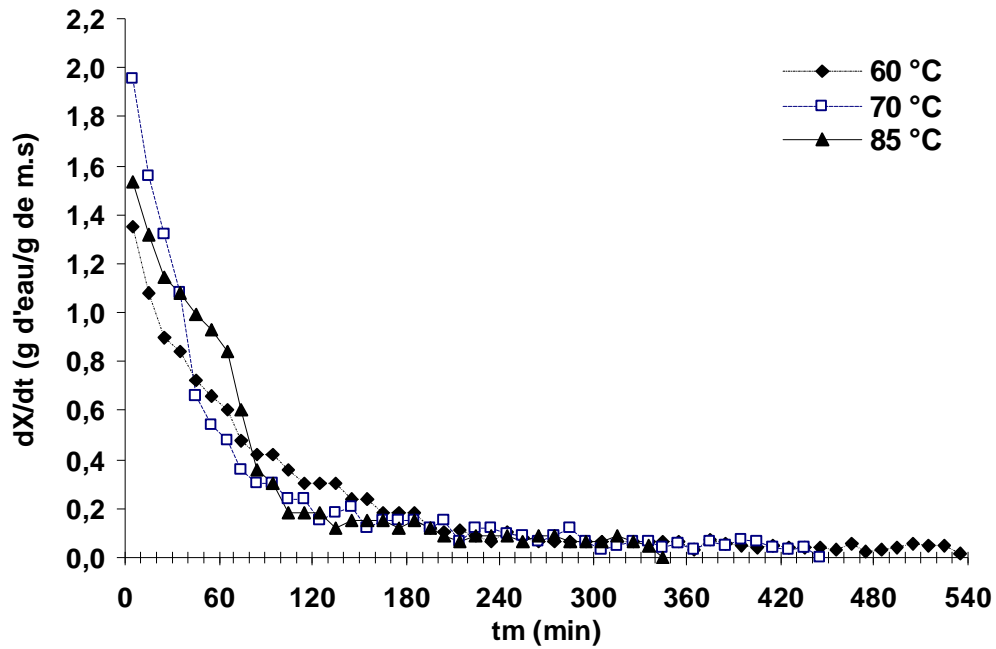
► Les courbes de séchage des températures de 60 ; 70 et 85°C montrent qu'à Δt_1 $8\text{h } 15\text{min}$ (495 min); $6\text{h } 15\text{min}$ (375min) et $5\text{h } 25$ min (325 min), les tranches atteignent la teneur en eau moyenne sur base sèche $X_{m1} = 0,097$; $0,095$ et $0,1$ g/g b.s ($8,84$; $8,67$ et $9,09\%$ sur b.h) respectivement. Cette durée est suffisante pour éliminer ΔX_{m1} de $1,816$; $1,768$ et $1,798$ g d'eau /g de masse sèche soit $64,49$; $63,87$ et $64,26\%$ sur base humide de la totalité de l'eau contenue dans l'ail.

La teneur en eau moyenne finale est atteinte après 40 min; $1\text{h } 10$ min et 20 min de plus pour éliminer respectivement $2,9$; $5,3$ et $1,3\%$ b.s ($2,82$; $5,03$ et $1,28\%$ b.h) d'eau restante de X_{m1} jusqu'à X_{mf} de $0,068$; $0,041$ et $0,086$ g/g b.s ($6,37$; $3,94$ et $7,92\%$ b.h).

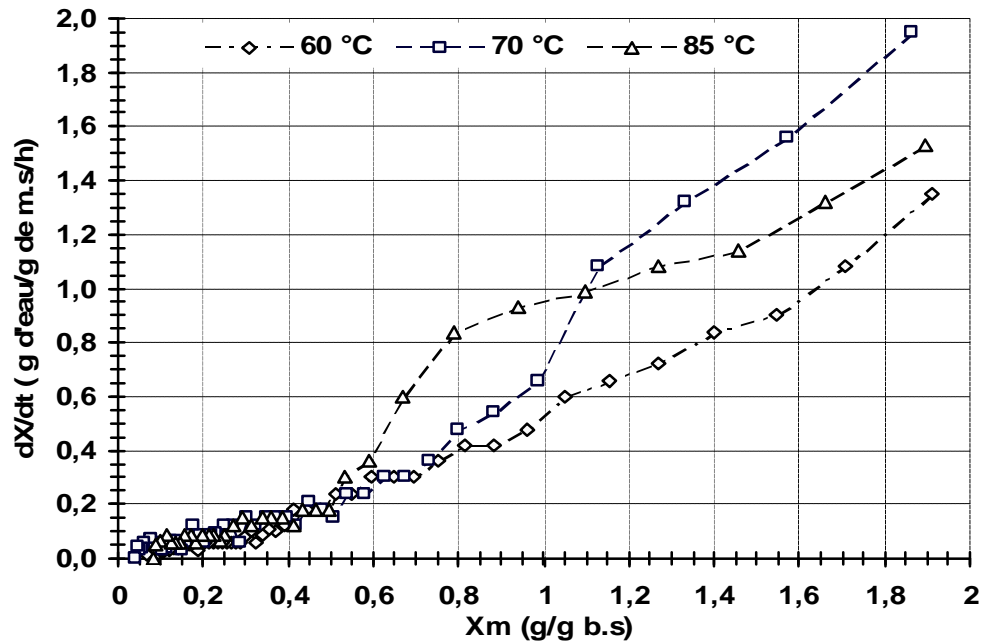
Le temps Δt_t de $8\text{ h } 55$; $7\text{h } 25$ min et $5\text{h } 45$ min (535 ; 445 et 345 min) correspond à l'évaporation de ΔX_{mt} $1,85$; $1,82$ et $1,81$ g d'eau /g de m.s soit $64,91$; $64,54$ et $64,41\%$ b.h (g d'eau évaporée par 100 g de masse humide) au cours du séchage de ces tranches d'ail de $7,8$ mm d'épaisseur.

La teneur en eau initiale des tranches d'ail d'épaisseur $7,8\text{mm}$ séchées à 60°C et à 85°C $66,94\%$, et de $65,67\%$ à 70°C .

L'effet de la température est important par le fait que la durée de séchage respective est plus courte à 85°C que pour les deux autres températures.



b : Vitesse de séchage de tranches d'Ail de 7,8 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de tranches d'ail de 7,8 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(X_m)$.

Figure 60 : Effet de la température de l'air sur la vitesse de séchage des tranches d'ail de 7,8 mm d'épaisseur ; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

► Le changement de pente est observé (figure 60 b et 60 c) à 65min (60 ; 85 °C) et à 35min (70 °C) de séchage, il correspond à X_m de 1,05 ; 1,13 et 0,79 g/g b.s (51,22 ; 53,05 et 44,13 % b.h) et à une vitesse de 0,6 ; 1,08 et 0,84 g d'eau/g m.s/h respectivement. Ces points correspondent à l'évaporation de 0,86; 0,73 et 1,11g/g b.s soit 46,24 ; 42,2 et 52,61 % sur base humide.

La vitesse de séchage montre une évaporation plus importante au début avec $(-dX/dt)_i$ élevée jusqu'au point d'inflexion avec changement de l'allure de la courbe et abaissement de la vitesse au fur et à mesure que la teneur en eau résiduelle diminue.

La diminution de la quantité d'eau évaporée à partir du point d'inflexion, ainsi que la faible vitesse à partir de ce changement de pente, nécessite une durée plus longue jusqu'à X_{mf} qui est de 7h 50min (470min) à 60 °C; 6h50min (410 min) à 70 °C et 4h 40 min (280 min) à 85°C pour évaporer 0,982 ; 1,089 et 0,704 g/g b.s soit 49,55 ; 52,13 et 41,31 % sur base humide. Ce temps correspond à 87,9 ; 92,1 et 81,2 % de la durée totale respective (60 ; 70 et 85 °C) du séchage.

6-1-2- Effet de la dimension sur la cinétique de séchage

►► Pour montrer l'effet de la taille de découpe sur les cinétiques et vitesses de séchage des rondelles séchées à 60 °C, la figure 61 (a, b et c) montre un effet important où les courbes des deux épaisseurs évoluent distinctement l'une de l'autre avec des vitesses initiales différentes de 1,83 et 1,35 g/g m.s/h correspondant à des teneurs en eau initiales ($t_{mi} = 5$ min) de 1,87 et 1,91 g/g b.s (65,16 et 65,64 % b.h). Il ressort que la vitesse la plus élevée est assurée par l'épaisseur la plus fine (5,9 mm) suivie par l'autre de 7,8 mm qui assure la plus faible vitesse. La durée de séchage suffisante pour atteindre X_{m1} et X_{mf} est plus courte avec 5,9 mm que celle de 7,8 mm.

Le temps mis à atteindre le point d'inflexion est plus court (45 min) avec 5,9 mm pour une quantité d'eau évaporée (0,95 g/g b.s soit 48,72 % b.h) plus élevée que celle de l'épaisseur 7,8 mm qui assure un temps de 65 min et ΔX_m moins important (0,86 g/g b.s soit 46,24 % b.h). Le temps le plus long est assuré par l'épaisseur 7,8 mm.

La difficulté d'extraire la quantité d'eau restante après le point de changement de pente est apparente chez l'épaisseur large de 7,8 mm que chez l'autre. En 7h55 min il est évaporée 0,982 g/g b.s (49,55 % b.h) avec 7,8 mm à comparer avec celle de 5,9 mm qui assure une évaporation de 0,887 g/g b.s (47,00 % b.h) en 5h 10 min seulement. Les temps respectifs de cette évaporation représentent la part la plus importante de la durée totale du séchage jusqu'à X_{mf} où celui de 5,9 mm est plus court que celui de 7,8 mm.

►► La figure 62 (b et c) montre l'effet de la taille de découpe sur la vitesse de séchage des tranches d'ail à 70 °C où il apparaît que les courbes des deux épaisseurs évoluent distinctement avec des vitesses initiales différentes l'une de l'autre 2,1 et 2,0 g/g m.s/h correspondant à des teneurs en eau initiales ($t_{mi} = 5$ min) de 1,85 et 1,86 g/g b.s (64,91 et 65,03 % b.h). Il ressort que la vitesse la plus élevée est assurée par l'épaisseur la plus fine (5,9 mm) suivie par celle de 7,8 mm.

La durée de séchage suffisante pour atteindre X_{m1} (4h45 min et 6h 15min) est plus courte avec 5,9 mm que celle de 7,8 mm.

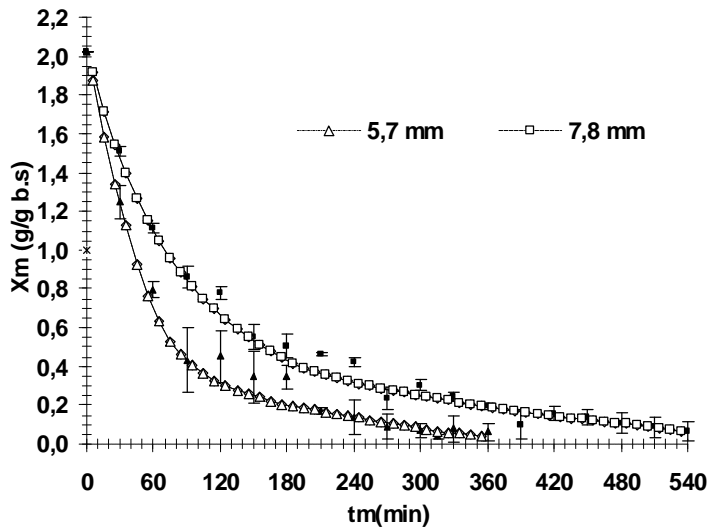
Le temps mis à atteindre le point d'inflexion est 55 min avec 5,9 mm pour une quantité d'eau évaporée (1,14 g/g b.s soit 53,27 % b.h) plus élevée que celle de l'épaisseur 7,8 mm qui assure un temps de 35 min et ΔX_m moins importante (0,72 g/g b.s soit 42,2 % b.h).

La difficulté d'extraire la quantité d'eau restante après le point de changement de pente est apparente chez l'épaisseur large de 7,8 mm que chez l'épaisseur fine.

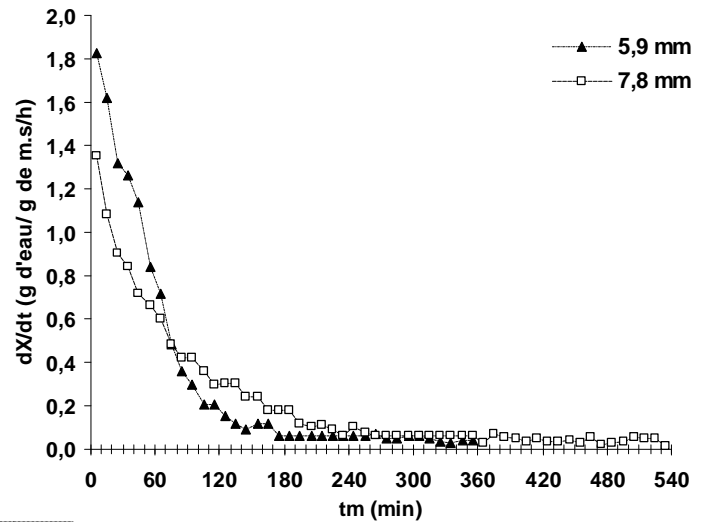
En 7h 00 min il est évaporé 1,099 g/g b.s (52,36 % b.h) avec 5,9 mm à comparer avec celle de 7,8 mm qui assure une évaporation de 0,689 g/g b.s (40,79 % b.h) en 6h 50 min. Les temps respectifs de cette évaporation représentent la part la plus importante 88,4 et 92,1 % de la durée totale du séchage jusqu'à X_{mf} .

►► La figure 63 (b et c) montre l'effet de la taille de découpe sur la vitesse de séchage des tranches d'ail à 85 °C où il apparaît que les courbes des deux épaisseurs évoluent distinctement l'une de l'autre jusqu'à la fin du séchage.

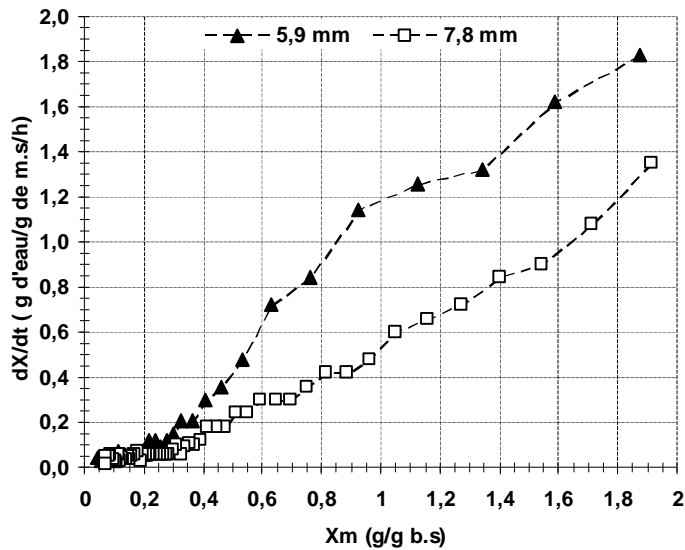
Les vitesses initiales sont différentes de 2,25 et 1,53 g/g m.s/h correspondant à des teneurs en eau initiales ($t_{mi} = 5$ min) de 1,84 et 1,9 g/g b.s (64,79 et 65,52 % b.h). Il ressort que la vitesse la plus élevée est assurée par l'épaisseur 5,9 mm et la plus faible est assurée par l'épaisseur 7,8 mm.



a : Cinétique de séchage de tranches d'Ail à 60°C;
 $X_m=f(t_m)$

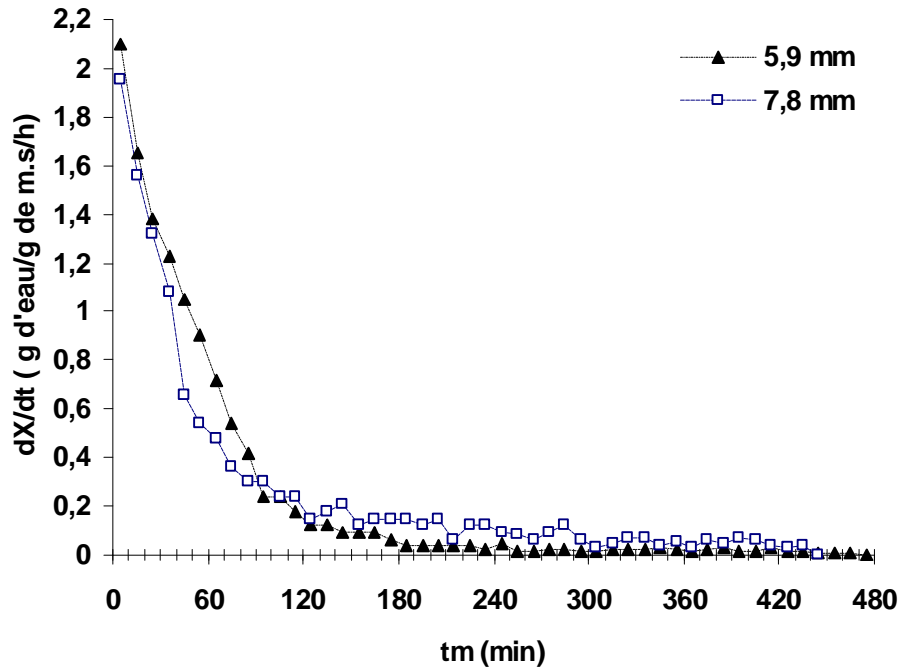


b : Vitesse de séchage de tranches d'Ail à 60°C ;
 $dX/dt = f(t_m)$

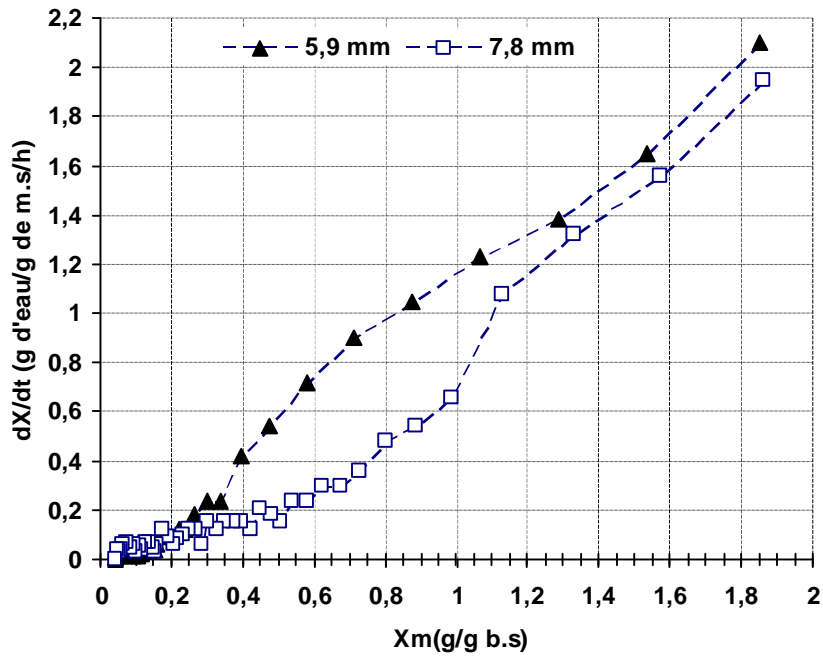


c : Vitesse de séchage de tranches d'Ail à 60°C;
 $dX/dt = f(X_m)$

Figure 61 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage des tranches d'ail séchées à 60 °C;(a) $X_m= f(t_m)$;(b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt =f(X_m)$



b : Vitesse de séchage de tranches d'Ail à 70°C;
 $dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de tranches d'ail à 70°C;
 $dX/dt = f(X_m)$.

Figure 62 : Effet de la taille de découpe sur la vitesse de séchage des tranches d'ail séchées à 70 °C ; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

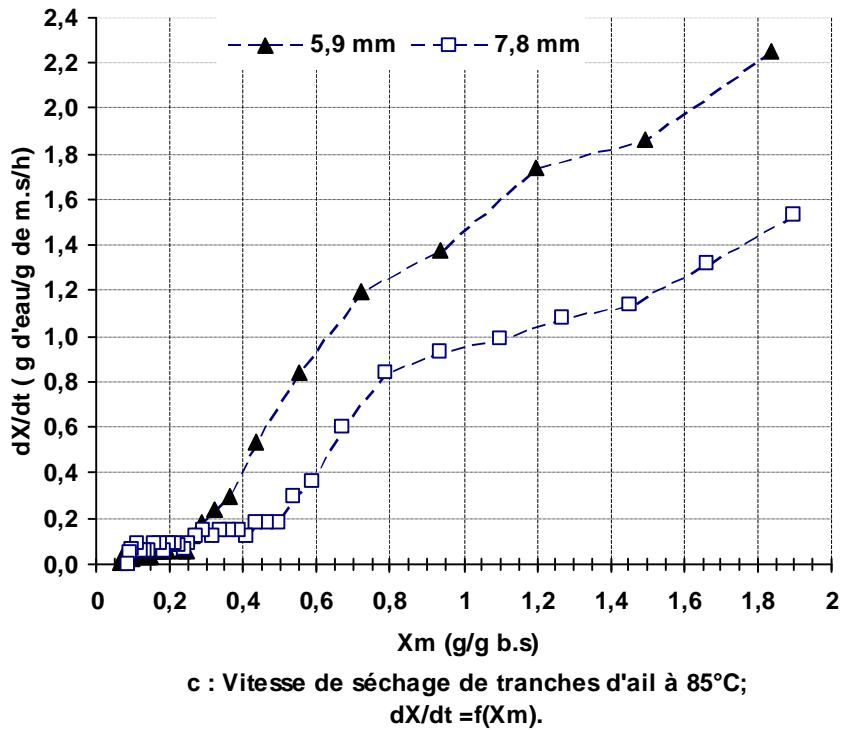
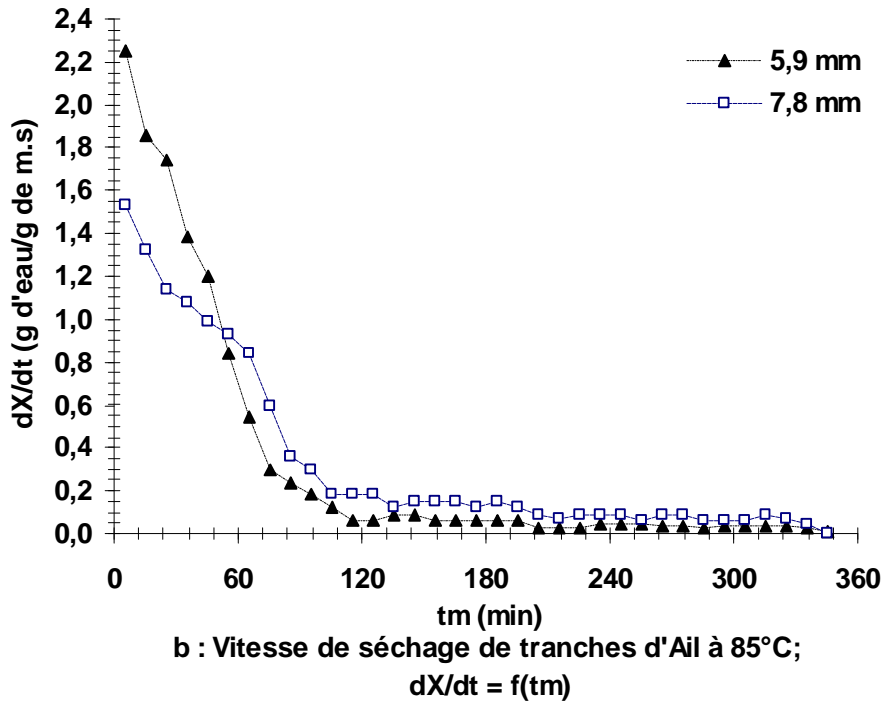


Figure 63 : Effet de la taille de découpe sur la vitesse de séchage des tranches d'ail séchées à 85 °C ; (b) -dX/dt = f (tm) et (c) -dX/dt =f (Xm)

La durée de séchage suffisante pour atteindre X_{m1} (4h45 min et 5h 25 min) et X_{mf} (5h45min pour 5,9 et 7,8 mm), est plus courte avec 5,9 mm que celle de 7,8 mm pour atteindre une teneur en eau moyenne X_m proche de 10 % b.s.

Le temps mis à atteindre le point d'inflexion est 45 min avec 5,9 pour une quantité d'eau évaporée (1,12 g/g b.s soit 52,83 % b.h) légèrement plus élevée que celle de 7,8 mm qui en 65 min assure une ΔX_m moins importante (1,11 g/g b.s soit 52,61 % b.h).

Le temps le moins long est assuré par l'épaisseur 5,9 mm et le plus long est assuré par l'épaisseur de 7,8 mm.

La difficulté d'extraire la quantité d'eau restante après le point de changement de pente est apparente chez l'épaisseur moins large de 5,9 mm que chez l'autre. En 5h00, il est évaporé 0,654 g/g b.s (39,54 % b.h) avec 5,9 mm à comparer avec celle de 7,8 mm qui assure une évaporation de 0,704 g/g b.s (41,31 % b.h) en 4h 40 min.

Les temps respectifs de cette évaporation représentent la part la plus importante, 87 et 81,2 % de la durée totale respective du séchage jusqu'à X_{mf} . Il est plus court avec 7,8 mm que celle de 5,9 mm.

6-1-3- Discussion et conclusion

Les courbes de cinétique et vitesse de séchage de tranches d'ail coupée en deux épaisseurs (5,9 et 7,8 mm), séchées à trois températures (60 ; 70 et 85°C), montrent l'absence de phase de séchage constante. L'évolution du séchage s'effectue en phase à allure de séchage décroissante, qui peut être divisée en deux sous phases selon la température et l'épaisseur des tranches.

La durée de séchage des tranches de 5.9 mm aux trois températures est assez courte et celles séchées à 85 °C assurent le temps le plus court des trois températures suivies par celles de 7,8 mm d'épaisseur. La petite épaisseur assure des vitesses de séchage plus élevées que l'autre épaisseur. L'effet de la température montre des phases où il s'atténue pour les deux épaisseurs, mais il reste plus important sur l'épaisseur 5,9 mm que sur l'autre épaisseur de 7,8 mm.

AKPINAR KAVAK (2006) rapporte que les phénomènes de séchage des produits biologiques se passent au cours de la phase de séchage à vitesse décroissante et sont contrôlés

par les mécanismes de diffusion liquide et/ou de diffusion de vapeur. Il suggère que ce comportement est fortement influencé par le transfert interne de diffusion de l'humidité qui contrôle ce phénomène.

Le séchage ne présentant que des périodes de séchage à régime décroissant; les tranches de 5,9 mm, séchant à deux vitesses (ou sous phases) de décroissance, avec une première sous phase rapide relative au départ de l'eau faiblement liée et une deuxième sous phase ralentie, jusqu'à la fin du séchage relative au départ de l'eau de plus en plus liée.

L'effet de la température paraît plus intéressant sur les cinétiques et vitesses de séchage par rapport à la première sous phase où la quantité d'eau évaporée est plus élevée correspondant à l'eau moins liée est assuré par la plus mince des deux épaisseurs. Il est montré aussi que la deuxième sous phase de décroissance, qui correspond à l'eau de plus en plus liée plus difficile à évaporer, est plus lente dont les durées respectives ont montré que les proportions sont comprises entre 81 et 92 % par rapport à la durée totale du séchage.

L'évolution des courbes de séchage se fait en forme d'escalier en deuxième sous phase pour l'épaisseur 7,8 mm montrant la difficulté du départ de l'eau de l'intérieur à la surface des rondelles à partir des X_m des points d'inflexions respectifs jusqu'à la fin du séchage.

L'influence de l'épaisseur des tranches d'ail sur la cinétique de séchage est très importante, ce qui est montré sur les figures 61 à 63 où les courbes de cinétique et de vitesse des deux épaisseurs séchées à la même température évoluent de manière distincte. La plus fine séchant plus rapidement que la plus épaisse.

L'importance de l'effet de la taille de découpe associé à celui de la température de l'air de séchage a montrée pour la majorité des courbes qu'ils sont significativement influents.

6-1-4- Activité de l'eau (a_w) de l'ail à l'état frais et séché

L'ail frais est râpé afin de permettre l'échange avec les solutions d'acide aux diverses HRE% jusqu'à l'équilibre durant sept (7) jours. La masse initiale des prises d'essais est présentée avec les variations de masse dans le tableau 28 a.

Les tranches utilisées pour la réalisation de la détermination de l'activité de l'eau ont été séchées trois (03) mois auparavant, conditionnées dans des sachets de polyéthylène thermo soudés et conservées à température ambiante du laboratoire.

Le mélange est obtenu à partir de tranches de l'épaisseur 5,9 mm séchées à 60 ; 70 et 85 °C, et de 7,8 mm séchées à 70 °C. La teneur en eau finale moyenne est de $0,062 \pm 0,02$ g/g b.s (5,84 % b.h).

Le mélange est broyé en poudre, pesé et mis à l'intérieur des différents bocaux contenant les solutions d'acide sulfurique ayants des HRE variées. Les échantillons sont maintenus à température ambiante jusqu'à équilibre et stabilisation de leur poids durant cinq (5) jours. L'équilibre est atteint entre 72 à 91h.

La température moyenne mesurée au cours de la détermination de l'activité de l'eau de l'ail à l'état frais est de $28 \pm 1,7$ °C et séché $23,7 \pm 0,7$ °C.

Tableau 28 a : Masse initiale moyenne et variation de masse des 3 essais de l'ail frais

Concentration d'H ₂ SO ₄ % (v/v)	6	15	36	mi moyen (g)
HRE % à 25°C	90,91	78,97	64,57	
mi moyen (g)	$0,631 \pm 0,01$	$0,611 \pm 0,004$	$0,626 \pm 0,015$	$0,62 \pm 0,01$
$\Delta m = (mi - mf / mi) \%$	0,559	0,637	0,745	

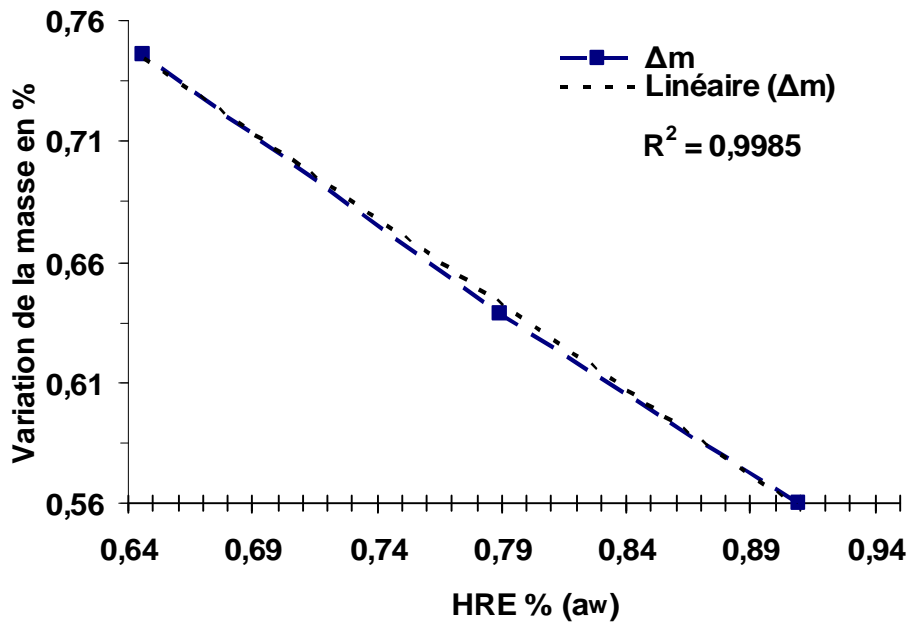
Tableau 28 b : Masse initiale moyenne et variation de masse des 3 essais de l'ail séché

Concentration d'H ₂ SO ₄ % (v/v)	36	46	64	88	mi moyen (g)
HRE % à 25°C	64,57	43,82	10,89	0,082	
mi moyen (g)	$0,628 \pm 0,01$	$0,634 \pm 0,09$	$0,641 \pm 0,24$	$0,600 \pm 0,27$	$0,6255 \pm 0,02$
$\Delta m = (mi - mf / mi) \%$	0,0129	0,0223	0,0386	0,0495	

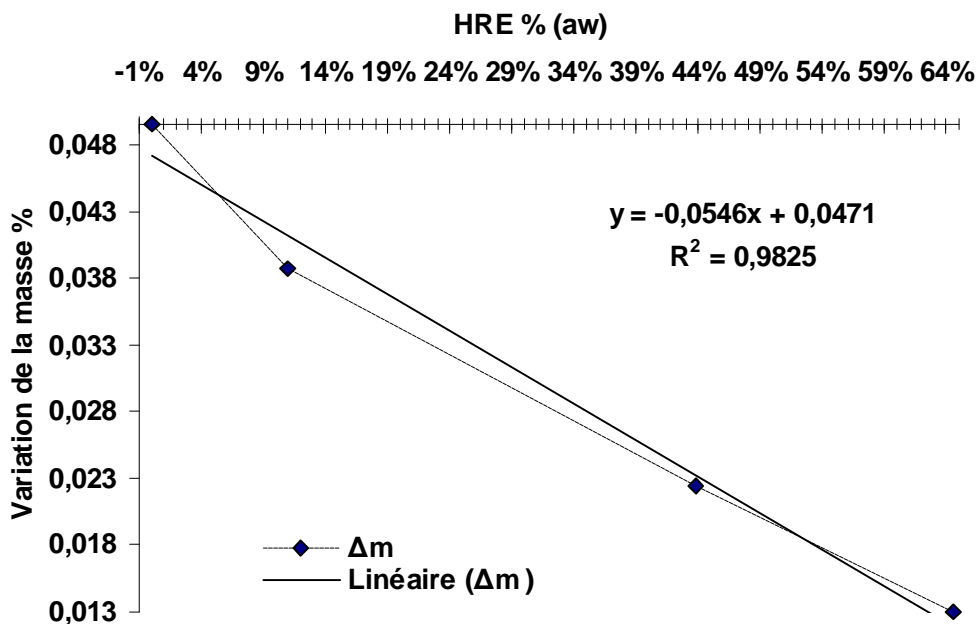
La moyenne de la variation de masse rapportée à la masse initiale en pourcentage des trois essais réalisés permet de donner les points pour tracer la courbe à partir de laquelle est tirée la valeur de l'*a_w* de nos échantillons.

Les courbes de mesure de l'activité de l'eau de l'ail frais et séché sont présentées dans la figure 64 a et b.

La détermination de la valeur de l'activité de l'eau est obtenue graphiquement à partir des courbes tracées pour chaque essai, avec un ajustement par une droite linéaire, qui coupe l'axe des HRE au point correspondant à l'équilibre.



a : Mesure de l'activité de l'eau "aw" de l'ail frais (aw=0,91)



b : Courbe de détermination de l'activité de l'eau de l'Ail séché, (aw = 0,047)

Figure 64 : Détermination de l'activité de l'eau de l'ail (a) frais et (b) séché.

La figure 64 a montre le point d'intersection qui permet d'obtenir la valeur de l' a_w de l'ail frais qui se situe approximativement à la valeur de 0,91.

La figure 64 b montre le point d'intersection de la moyenne de trois essais qui est situé à la valeur de $0,047 \pm 0,003$.

Ainsi l'ail avec une teneur en eau initiale moyenne de 65,67 % sur base humide ($X_i=1,913$ g/g b.s) aurait une activité de l'eau a_w voisine de 0,91. Les tranches séchées aux teneurs en eau moyenne de 0,062 g/g b.s auraient une activité de l'eau (a_w) voisine de 0,047.

Ce niveau d'activité compris entre 0 et 0,2 correspond aux forces de liaisons très intenses empêchant le mouvement moléculaire de s'exprimer (MAFART, 1991), permet une durée de conservation de nos échantillons relativement longue, dans les conditions de température ambiante (25 ± 3 °C).

BIMBENET et coll., (2002b), rappelant que l'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année). Les teneurs en eau atteintes par le séchage de l'ail permettent sa conservation pour une durée approximative d'une année.

ROUX (1994), rapporte que la teneur en eau de 0,17-0,08 g/g de m.s (soit 14,5-7,4% base humide) et à partir d'une a_w de 0,3 le produit se conserve à l'abri de l'air (conditionnement) et à température ambiante.

L'oxydation des acides gras insaturés est très élevée dans les produits ayant une $a_w < 0,1-0,2$, par fixation de l'oxygène sur les radicaux libres. La stabilité maximale serait obtenue lorsque la monocouche des molécules d'eau ($a_w = 0,2$) s'oppose au passage de l'oxygène jusqu'au lipides ou entre en compétition avec les molécules d'oxygène pour occuper des sites d'absorption selon ALAIS et coll. (2004).

La couche monomoléculaire d'eau correspondrait à une activité de l'eau de 0,1 à 0,2. L'eau liée représente entre 3-10 g /100g de poids sec (3-10% b.s).

Les produits aux a_w comme le notre doivent être conservés dans un emballage étanche à l'oxygène et opaque faisant barrière à la lumière et rayons du soleil pour éviter les risques d'oxydation.

6-2-Evolution de la qualité de l'ail au cours du séchage

6-2-1-Rétrécissement et déformation

La forme spécifique de ce légume a montré des difficultés de réaliser les mesures de dimensions au cours du séchage. Nous nous limitons donc à commenter les prises de vues qui montrent l'évolution des tranches au cours du temps en fonction de la teneur en eau.

Au cours du séchage de l'ail à 60 °C, les tranches des deux épaisseurs ont présentées un dessèchement en surface qui apparaît à partir de 2h00. Le rétrécissement commence à partir de 2h 30min avec durcissent en surface jusqu'à la fin du séchage.

Les tranches d'ail séchées à 85 °C subissent plus de changement d'aspect avec apparition du rétrécissement à partir de 2 h aux teneurs en eau respectives de 0,25 et 0,273 g/g b.s (20 et 21,45 % b.s) pour l'épaisseur 5,9 et 7,8 mm. Le durcissement s'installe avec formation d'une croûte à partir de 3 h de temps de séchage sur les deux tranches jusqu'à teneur en eau finale.

6-2-2-Changeement de la couleur

Il est observé à 60 °C un léger brunissement qui commence à partir de 5 h sur les tranches de 7,8 mm à une teneur en eau de 0,30 g/g b.s (23,1 % b.h) jusqu'à la fin du séchage. Les tranches de 5,9 mm ne brunissent pas (photos de la figure 66a et 66 b).

Les tranches d'ail séchées à 85 °C subissent plus de changement de couleur avec apparition du brunissement à partir de 2 h aux teneurs en eau respectives de 0,25 et 0,273 g/g b.s (20 et 21,45 % b.s) pour l'épaisseur 5,9 et 7,8 mm. Le brunissement s'accroît vers les teneurs en eau basses de 0,122 et 0,176 g/g b.s (10,87 et 14,96 % b.h) aux temps respectifs de 4h 30min et 5 h00 (5,9 et 7,8 mm).

Les tranches les plus épaisses à 60 °C brunissent légèrement , les moins épaisses, ne changent pas de couleur .Dans le cas du séchage à 85 °C , le brunissement est apparent sur les tranches des deux épaisseurs. L'effet de la température sur la qualité du produit mis en évidence par l'aspect des morceaux séchés (photos des figures 65 et 66) est très significatif.

Les tranches séchées à 70 °C ont présenté un brunissement moindre que celui de 85 °C.

L'effet de l'épaisseur est apparent par l'aspect des tranches séchées à 60 °C dont les plus épaisses montrent une différence d'aspect par rapport aux moins épaisses.

Le durcissement avec croûtage en surface qui accompagne le brunissement sur les tranches séchées à 85 °C montre que l'effet de l'épaisseur de découpe n'est pas significatif vu qu'au niveau des deux épaisseurs, le changement de l'aspect et de la couleur sont les mêmes.

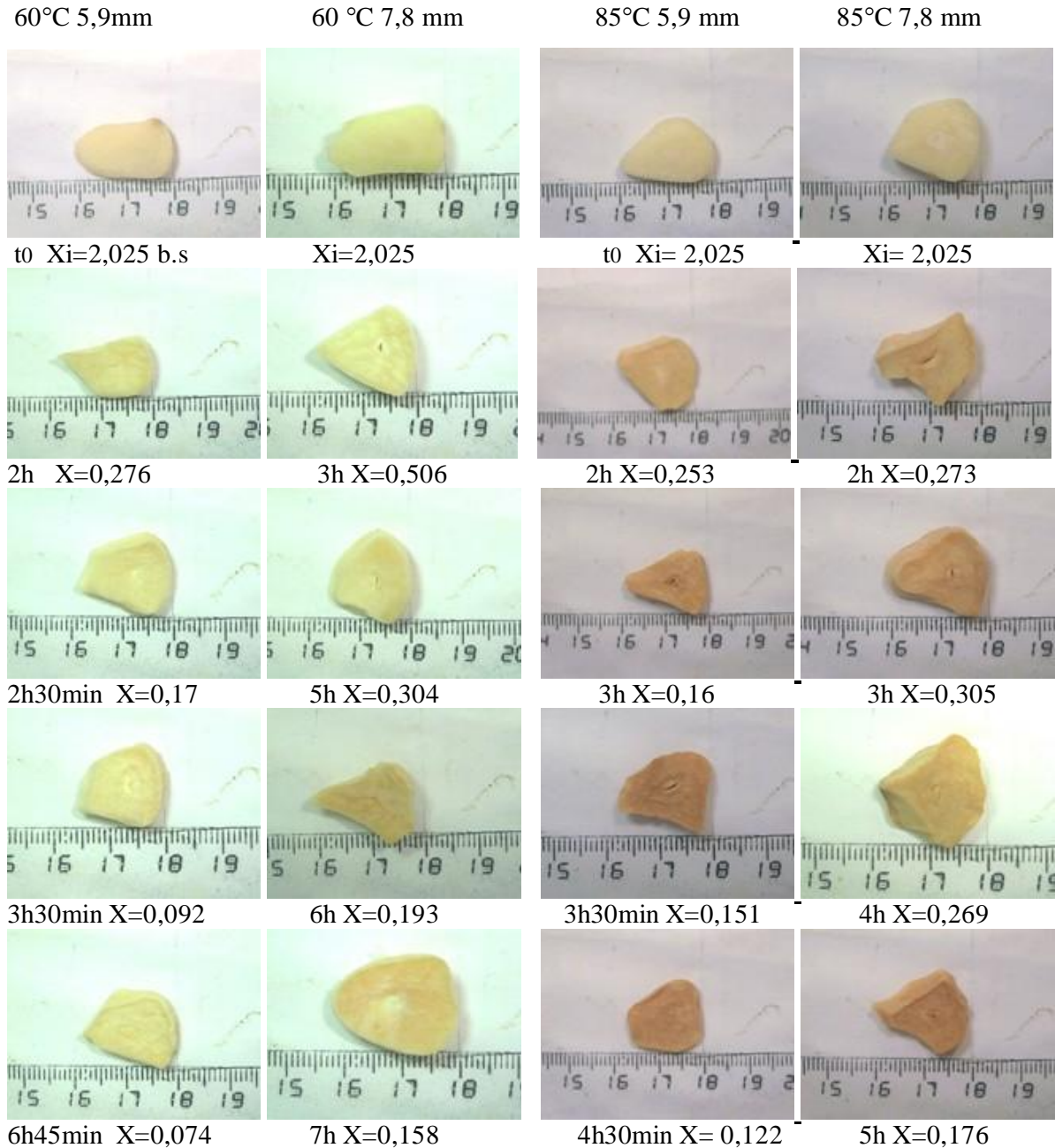


Figure 65 : Prises de vue de changement de forme et de couleur de tranches d'ail 5,9 (a) et 7,8 (b) mm d'épaisseur, séchées à 60 °C

Figure 66 : Prises de vue de changement de forme et de couleur de tranches d'ail 5,9 (a) et 7,8 (b) mm d'épaisseur, séchées à 85 °C

L'effet de la température sur la qualité des tranches d'ail séchées à 60 et 85°C est mis en évidence par les photos (figure 65 et 66) qui montrent une influence notable où celle de 70 °C brunissent moins qu'à 85 °C qui subit plus de changement d'aspect et de couleur.

À basse teneur en eau la structure cellulaire perd, sa capacité de rétraction par rigidification; ce phénomène dépend des conditions de séchage; cas du séchage rapide selon DO AMARAL SOBRAL et coll. (2001). Ce phénomène est observé sur les tranches séchées à 85 °C. Il est remarqué que les morceaux séchés à 60 °C rétrécissent plus que ceux séchés à 85 °C. Ces derniers ont présenté une durée de séchage plus courte dont le durcissement de la surface aurait limité la diminution de leur taille.

6-3- Réhydratation du légume séché

L'évolution de l'absorption d'eau par les tranches d'ail transformée en teneurs en eau absorbées et exprimées en taux de réhydratation par rapport à la teneur en eau initiale ($X_i=2,025$ et $1,81$ g d'eau/g de m.s soit $x_i= 66,94\%$ et $64,4 \%$ b.h) respectivement pour 60 et 85 °C et 70 °C. Ils sont calculés à partir des teneurs en eau qui évoluent dans le temps, et permettent de tracer les courbes de la réhydratation du légume. Les teneurs en eau finales des tranches après séchage et après réhydratation (X_{fsec} , $X_{réh}$, épif séc, épif réh), avec leur taux de réhydratation final, sont résumées dans le tableau 29.

Les tranches mises à réhydrater ont été séchées entre deux et quatre mois auparavant aux teneurs en eau finales comprises entre $0,064$ et $0,094$ g/g b.s ($6,01$ et $8,59 \%$ b.h) (tableau 29). Il a été testé deux tranches par essai pour l'épaisseur $5,9$ mm (60 ; 70 et 85 °C), pour $7,8$ mm, une seule tranche est réhydratée (60 et 70 °C) et deux (85 °C) (figure 67).

L'eau de réhydratation des tranches d'ail séchées à 85 °C s'est colorée en brun ($5,9$ mm), elle est devenue brunâtre à cause du brunissement non enzymatique subi par l'ail ($7,8$ mm).

Il est noté la reprise de la taille initiale et de la forme d'avant séchage des tranches réhydratées (figures 67 a, b et c).

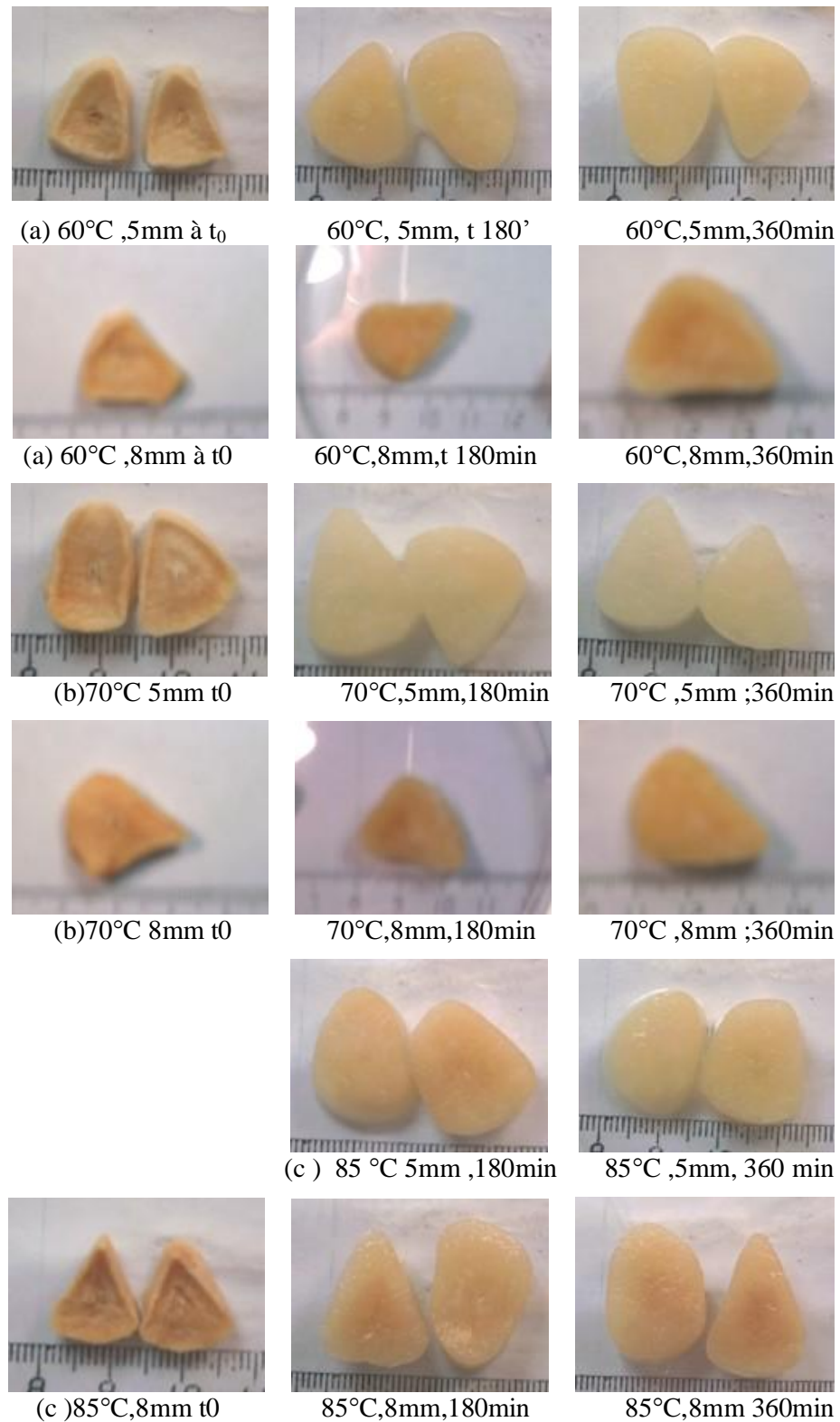


Figure 67 : Prises de vue de l'évolution de la réhydratation de tranches d'ail de 5,9 et 7,8 mm d'épaisseur, séchées à 60 °C (a),70 °C (b) et 85 °C (c) réhydratées à l'eau distillée à température ambiante

Tableau 29 : Taux de Réhydratation (TR) de l'ail (à 26±2°C) en fonction de la température de séchage et de la taille de découpe.

T° de séchage	épi de découpe (mm)	Xi b.s/xi b.h	temps séchage (min)	mi moy. 3 essais (g)	épf réhyd (mm)	X f séché (g/g)	Xréh (g/g)	TR= Xréh/Xi*100 (%)
60°C	5,9±0,3	2,03/66,94%	330	0,29±0,01	5,0	0,069	2,18	107,7±3,0
	7,8±0,2		500	0,83±0,12	7,2	0,094	1,73	85,4±13,6
70°C	5,9±0,3	1,81/64,4%	390	0,36±0,03	4,7	0,068	1,88	103,7±13,8
	7,8±0,2		320	1,08±0,06	7,0	0,064	1,21	66,8±22,2
85°C	5,9±0,3	2,03/66,94%	150	0,51±0,04	5,0	0,077	1,79	88,6 ±0,9
	7,8±0,2		180	0,92±0,06	7,5	0,089	1,8	89,1±5,2

6-3-1- Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation de l'ail

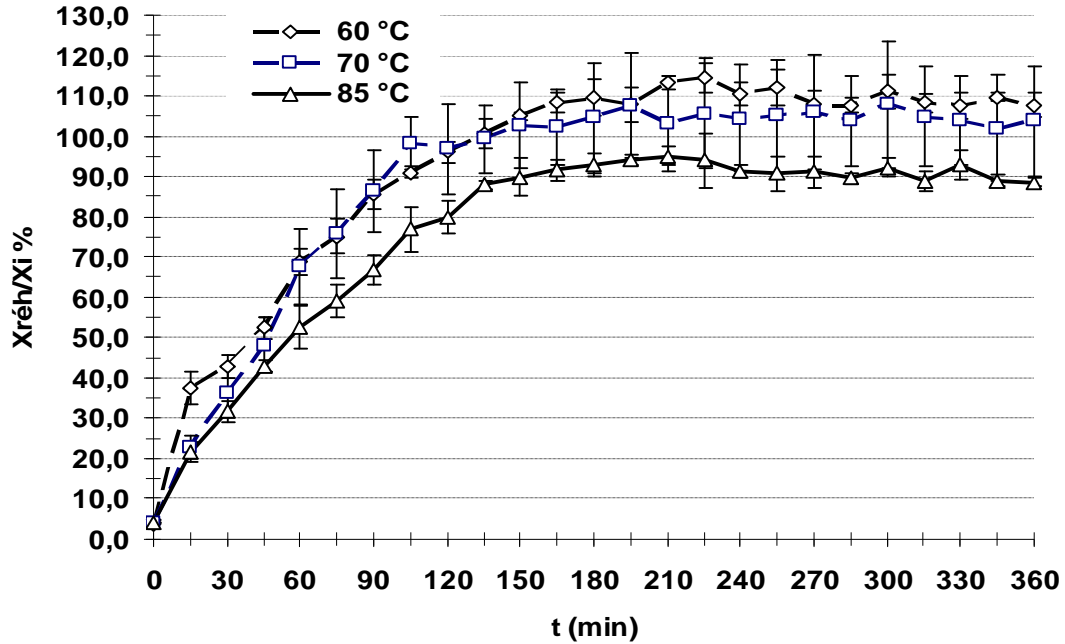
Les allures du taux de réhydratation de chacune des tranches d'épaisseur 5,9 et 7,8 mm séchées aux températures 60 ; 70 et 85°C, sont représentées par les courbes des figures 68 a et b qui montrent l'effet de la température de séchage sur leur capacité d'absorption d'eau.

- Sur la figure 68 a, les courbes montrent que l'évolution de la réhydratation de la tranche de 5,9 mm est différente pour chaque température. Le taux de réhydratation le plus élevé est assuré à 60 °C avec 107,7 % suivi de celle de 70 °C avec 103,7 % et celle de 85 °C présente le plus faible taux de réhydratation avec 88,6 %. Dans ce cas l'effet de la température est apparent.

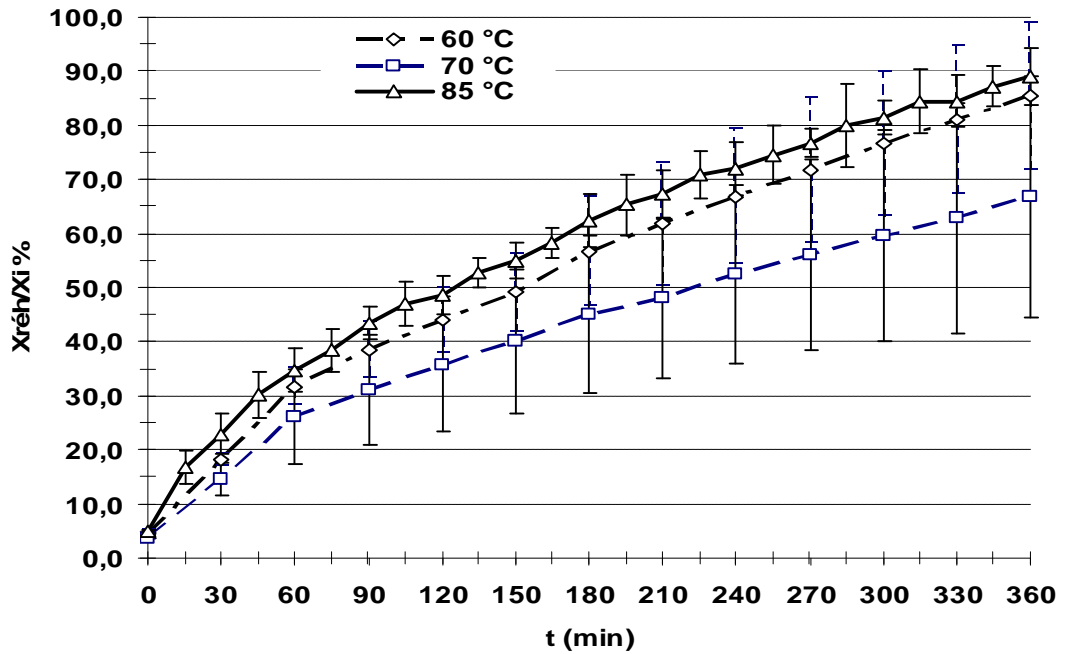
- La figure 68 b de l'épaisseur 7,8 mm, montre une influence moins significative de la température de séchage sur l'évolution des courbes obtenues avec les trois températures. Le taux de réhydratation de 85 et 60 °C avec 89,1 et 85,4 % est supérieur à celui de 70°C qui donne le plus faible des taux 66,8 %.

L'effet observé avec l'épaisseur de 7,8 mm à 70°C est probablement du au rétrécissement et le phénomène de durcissement issu du croûtage et brunissement qui ont contribué à limiter sa capacité de réhydratation par rapport à l'ensemble des tranches d'ail.

Ces observations nous amènent à dire que probablement l'effet de la température sur les composants essentiels de l'ail ; à savoir l'amidon, protéines et fibres (22,1 ; 7,0 et 3,0 g/100g de produit selon FAVIER et coll. (1995)) qui auraient subi une altération freinant ainsi la capacité d'absorption de l'eau chez l'épaisseur 7,8 mm à 70 °C .



a : Effet de la température sur la capacité se réhydratation des tranches d'ail de 5,9 mm d'épaisseur



b : Effet de la température sur la capacité de réhydratation des tranches d'ail de 7,8 mm d'épaisseur

Figure 68: Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation de tranches d'ail de 5,9 mm (a) et 7,8 mm (b) d'épaisseur, réhydratées à l'eau distillée à température ambiante

Cependant la richesse de l'ail en ces éléments aurait probablement contribué à atteindre des taux de réhydratation assez conséquents supérieur à 85 % et dépassant les 100 % pour les autres tranches séchées aux autres températures..

Il est probable qu'avec 60°C, la durée d'exposition (8h20 min) au cours du séchage aurait pu provoquer des altérations sur le tissu de l'ail (membranes cellulaires) qui perdrait sa capacité de rétention d'eau.

Les tranches séchées à 85°C avec un temps court ont brunis au cours du séchage ,étant donné la durée d'exposition courte la capacité d'absorption n'a pas été affectée.

En plus des effets mécaniques lors du séchage sur les propriétés de structure, le brunissement et le croûtage du aux solutés qui accompagnent l'eau au cours de la première sous période de séchage avec éventuelle obstruction des pores, dont les conséquences sont un durcissement qui a été observé et remarqué sur les tranches d'ail ; tous ces aspects ralentissent et constituent des facteurs limitants la réhydratation.

Pour ce qui est de la porosité selon SARAVACOS (1995); un produit amidonné humide a une petite porosité qui augmente considérablement durant le séchage, c'est probablement ce qui s'est passé chez les tranches séchées à 60 °C . Malgré un durée plus longue, elles auraient une porosité assez importante qui a permis d'atteindre des taux de réhydratation assez élevée.

6-3-2- Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de l'ail

L'effet de l'épaisseur sur le taux de réhydratation est aussi important que celui de la température, ce qui est montré dans les figures 69 a ,b et c par les courbes d'évolution de la réhydratation des tranches des deux épaisseurs séchées à chacune des températures 60 ;70 ou 85°C.

Il apparaît que la dimension du légume séché a une influence significative sur l'allure de la réhydratation. Les courbes sont bien distinctes d'une épaisseur à l'autre et ont données des taux de réhydratations différents.

-Les tranches de la petite épaisseur (5,9±0,3mm) sont celles qui ont données les taux de réhydratation les plus élevés de 107,7 % à 60 °C (figure 69a), suivies par celles de 8,9±0,2 mm 85,4 %.

- Les tranches séchées à 70 °C (figure 69 b) montrent un effet assez significatif par une évolution des courbes bien distinctes et séparées l'une de l'autre. Le taux le plus élevé est obtenu par l'épaisseur de 5,9 mm avec 103,7 %, suivi par les tranches de 7,8 mm 66,8 % qui est le plus faible de l'ensemble des tranches séchées.

- Les tranches séchées à 85 °C (figure 69 c) montrent une différence dans leur évolution pour atteindre des taux de réhydratation quasiment le même ; le plus élevé 89,1 % obtenu par l'épaisseur 7,8 mm, suivi par celui de l'autre épaisseur 5,9 mm avec 88,6 %.

Le comportement de ces dernières tranches est du au fait qu'elles ont subi un durcissement et brunissement en surface assez importants qui auraient limité la capacité de réhydratation et donner un niveau d'absorption similaire. Cependant la capacité d'absorption de celle de 5,9 mm est plus élevée du fait que sa vitesse d'absorption d'eau est plus élevée en comparant le taux de réhydratation à 3 h , il est 92,85 et de 62,4 % pour 7,8 mm.

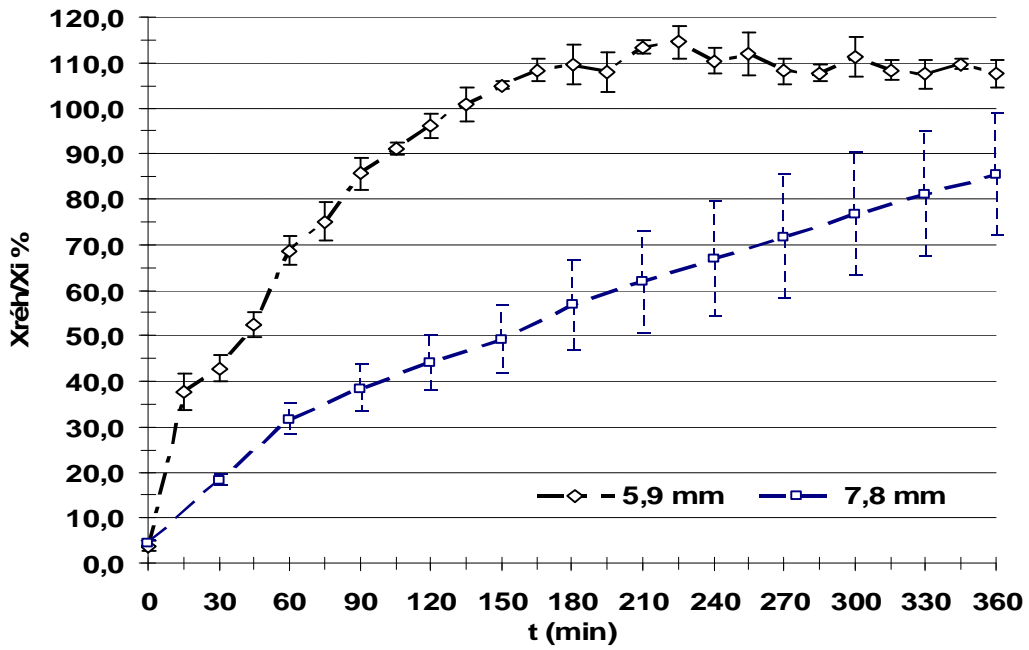
Dans tout les cas de figure, l'épaisseur la plus faible 5,9 mm a donné les taux de réhydratation les plus élevés par rapport à l'autre épaisseur 7,8 mm L'effet de l'épaisseur est très significatif dans la mesure où la plus petite épaisseur assure les taux de réhydratation les plus élevés par rapport à celle qui est plus épaisse.

L'épaisseur 5,9 mm a atteint le plateau de saturation entre 1h 45min et 2h15min ; 96,07 % (2h00), 98,17 % (1h45min) et 87,97 % (2h15min) respectivement avec les trois températures 60 ,70 et 85 °C.

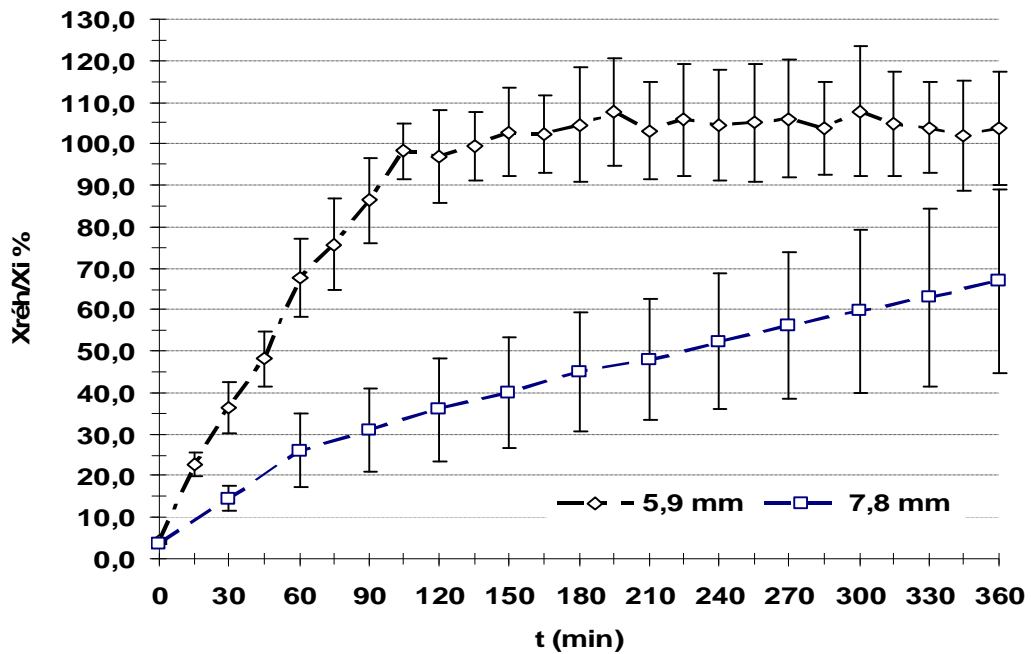
Les courbes de réhydratation évoluent distinctement l'une de l'autre pour les trois températures de séchage malgré des écarts type assez importants (cas des tranches séchées à 70 °C). Ceci nous amène à dire que l'effet de la température de séchage sur le taux de réhydratation est important du point de vue altération de la structure du produit.

DO AMARAL SOBRAL et coll. (2001) pensent que les effets dus aux caractéristiques mécaniques du produit dépendent des conditions de haute température, le séchage étant plus rapide, les gradients internes de teneur en eau sont plus élevés, la surface est plus sèche, donc plus rapide que dans les conditions de séchage lent.

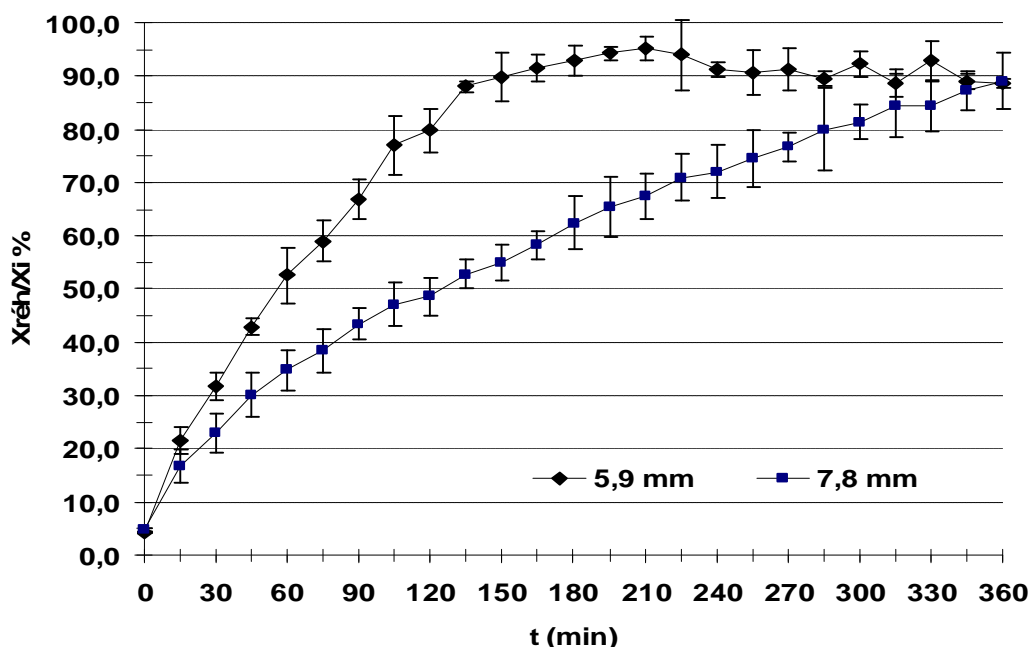
Cette surface est moins capable de se déformer pour accompagner la réduction de volume interne due à la perte d'eau. Donc la rigidification de la surface du produit entraîne l'apparition d'une porosité, elle est d'autant plus importante que la température et la vitesse de l'air entraînent un séchage plus rapide.



a : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation des tranches d'ail séchées à 60 °C



b : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation des tranches d'ail séchées à 70 °C



c : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation des tranches d'ail séchées à 85 °C

Figure 69: Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de tranches d'ail séchées à 60 °C (a) ; 70 °C (b) et 85 °C (c) et réhydratées à l'eau distillée à température ambiante

Ces constatations sont observées chez nos tranches d'ail séchées à 85 °C qui ont moins rétrécit et assurées le taux de réhydratation relativement élevés.

Dans le cas de nos échantillons, la meilleure capacité de réhydratation est assurée par la température de séchage et l'épaisseur les plus faibles, qui n'a subi aucune altération ni changement de couleur. Ensuite vient celle de 70 °C et de 85 °C.

6-4-Séchage solaire

6-4-1- Performances du séchoir

Les performances du séchoir confectionné étant déjà présenté au niveau du § 5-4-1

Les variations de température au cours du séchage de l'ail sont noté et présentées dans le tableau 30 ; (a) épaisseur 5 mm et (b) pour 8 mm.

Tableau 30 : Variation de température de séchage solaire de l'ail

jour	t de l'air entrée réchauffeur (°C)	t int. de réch (°C)	t interne réchauffeur (sortie)(°C)	t de sortie chambre (°C)
1 ^{er}	31±2	42±5	55±8	41±4
2 ^{ème}	31±8	40±4	55±5	37±2
3 ^{ème}	32±1	44±2	60±6	45±4
4 ^{ème}	31±1	40±2	52±7	37±1
t moy±écart type	31,3±0,4	41,5±1,7	55,5±2,9	40,0±3,3

6-4-2- Cinétique de séchage

L'évolution de la cinétique de séchage des tranches d'ail coupées en 5,2 et 8,03 mm d'épaisseur est présentée dans la figure 70.

Les courbes expérimentales sont lissées manuellement en Δt de 30 min (figure 70 a) pour permettre la transformation de l'évolution de la teneur en eau en vitesse de séchage en fonction du temps moyen (figure 70 b) et en fonction de la teneur en eau moyenne (figure 70c).

Les échantillons d'ail de 5,2 mm d'épaisseur ont été séché en trois jours et celles de 8,03 mm en quatre jours avec une durée de séchage de cinq heures par jour (figure 70 a).

En fin de chaque journée de séchage les échantillons sont placés dans un dessiccateur durant la nuit (19 heures) où nous avons noté une variation de masse et donc perte d'humidité.

Cette perte est en moyenne ΔX 0,329 g/g b.s soit 24,75 % sur base humide (1^{ère} nuit entre la 5^{ème} et la 6^{ème} heure de séchage) et 0,025 g/g b.s soit 2,44 % b.h (2^{ème} nuit entre la 10^{ème} et 11^{ème} heure de séchage) soit en totalité 0,354 g/g b.s (26,14 % b.h) pour l'épaisseur 5,2 mm.

Elle est de ΔX 0,421 g/g b.s soit 29,63 % b.h (1^{ère} nuit entre la 5^{ème} et la 6^{ème} heure) et 0,106 g/g b.s soit 9,58 % b.h (2^{ème} nuit entre la 10^{ème} et 11^{ème} heure), et enfin 0,041 g/g b.s soit 3,94 % b.h (3^{ème} nuit entre la 15^{ème} et 16^{ème} heure de séchage) soit en totalité 0,568 g/g b.s (36,22% sur base humide) pour l'épaisseur 8,03 mm.

Les vitesses de séchage initiales au tmi 15 min sont de 0,758 et 0,498 g/g m.s/h respectivement pour les deux épaisseurs 5,2 et 8,03 mm.

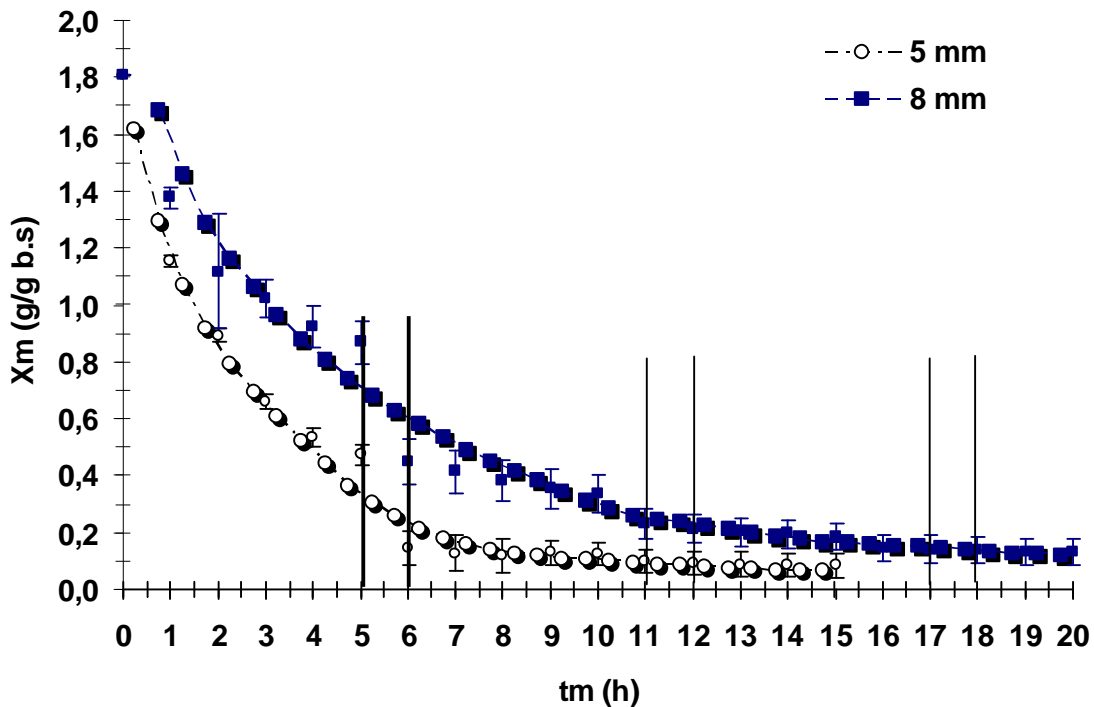
Les tranches de 5,2 mm d'épaisseur sont séchées pendant un Δt de 15 heures (trois jours) avec ΔX totale de 1,74 g/g b.s soit 63,5 % b.h. La variation de la teneur en eau en 5 heures de séchage du 1^{er} jour est de 1,479 g/g b.s (59,66 % b.h). La deuxième journée de séchage avec

Δt 5 h, ΔX est 0,13 g/g b.s (11,5 % b.h) et le troisième jour ΔX est de 0,021g/g b.s (2,06 % b.h) jusqu'à la teneur en eau finale X_f de 0,069 g/g b.s soit 6,45 % sur base humide.

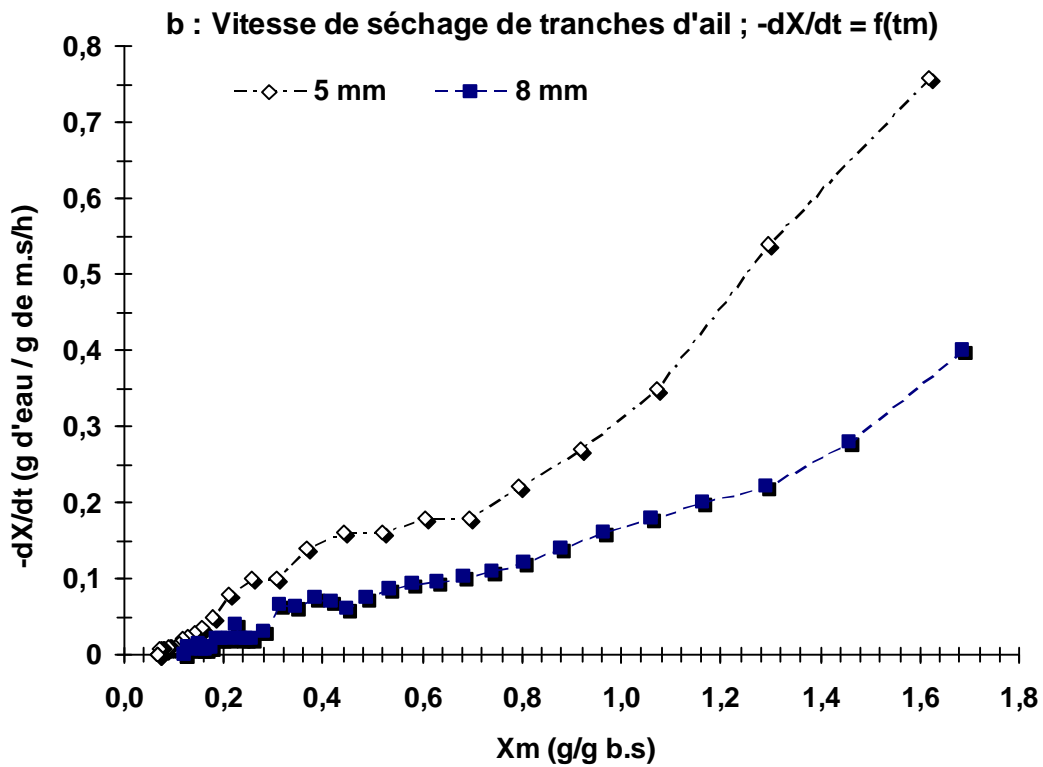
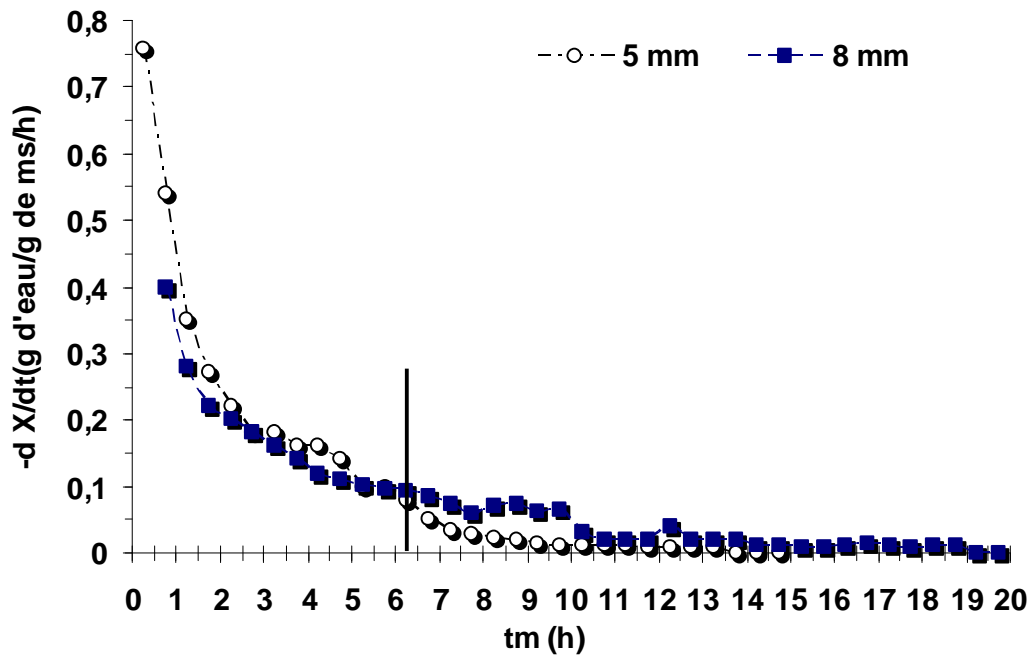
Les tranches de 8,03 mm sont séchées pendant un Δt de 20 heures (quatre jours) avec ΔX total de 1,69 g/g b.s soit 62,83 % b.h . La variation de la teneur en eau dans les 5heure de la première journée de séchage est de 1,28 b.s (56,14 % b.h) , de 6 à 10 h de séchage ΔX est 0,2 b.s (16,67 % b.h),entre 11 et 15 h ΔX est de 0,06 b.s (5,66 % b.h) et enfin les cinq dernières heures de séchage ΔX est de 0,03 g/g b.s (2,91 % b.h) à la teneur en eau X_f de 0,12 g/g b.s soit 10,71% sur base humide.

L'allure générale des courbes de cinétique et de vitesse de séchage montre que le séchage se déroule en phase de vitesse décroissante en l'absence des deux phases; constante et de mise en température. Cette phase décroissante montre qu'il est possible de subdiviser en .sous phases.

Les figures 70 b et 70 c montrent des points d'inflexions où le changement de pente est illustré par une variation de l'évolution de la vitesse de séchage en deux sous phases.



a : Cinétique de séchage solaire de tranches d'ail ; $X_m = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage solaire de tranches d'ail ; $-dX/dt = f(X_m)$

Figure 70 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage des tranches d'ail de 5,2 et 8,03 mm d'épaisseur ; (a) $X_m = f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

Une première sous phase pour l'épaisseur de 5,2 mm, à décroissance rapide jusqu'à X_m de 0,695 g/g b.s (41,0 % b.h) correspondant à Δt_1 de 3h 15 min (195 min) et ΔX_m 1,114 g/g b.s soit 52,7 % b.h.

La deuxième sous phase de décroissance ralentie jusqu'à la teneur en eau finale X_f 0,069 b.s (6,45 % sur base humide) correspond à ΔX_{mf} 0,626 g/g b.s soit 38,5 % sur base humide. Le Δt_2 de 11 h 45 min (705 min) correspond 78,3 % de la durée totale du séchage.

Une première sous phase pour l'épaisseur de 8,03 mm, à décroissance rapide jusqu'à X_m de 0,805 g/g b.s (44,6 % b.h) correspondant à Δt_1 de 4h 15 min (235 min) et ΔX_m 1,005 g/g b.s soit 50,12 % b.h.

La deuxième sous phase de décroissance ralentie jusqu'à la teneur en eau finale X_f 0,12 b.s (10,7 % sur base humide) correspond à ΔX_{mf} 0,685 g/g b.s soit 40,65 % sur base humide. Le Δt_2 de 16 h 05 min (965 min) correspond 80,4 % de la durée totale du séchage.

6-4-3- Evolution de la qualité de l'ail au séchage solaire

Des prises de vues montrant l'évolution des tranches d'ail au cours du séchage sont présentées en figure 71.

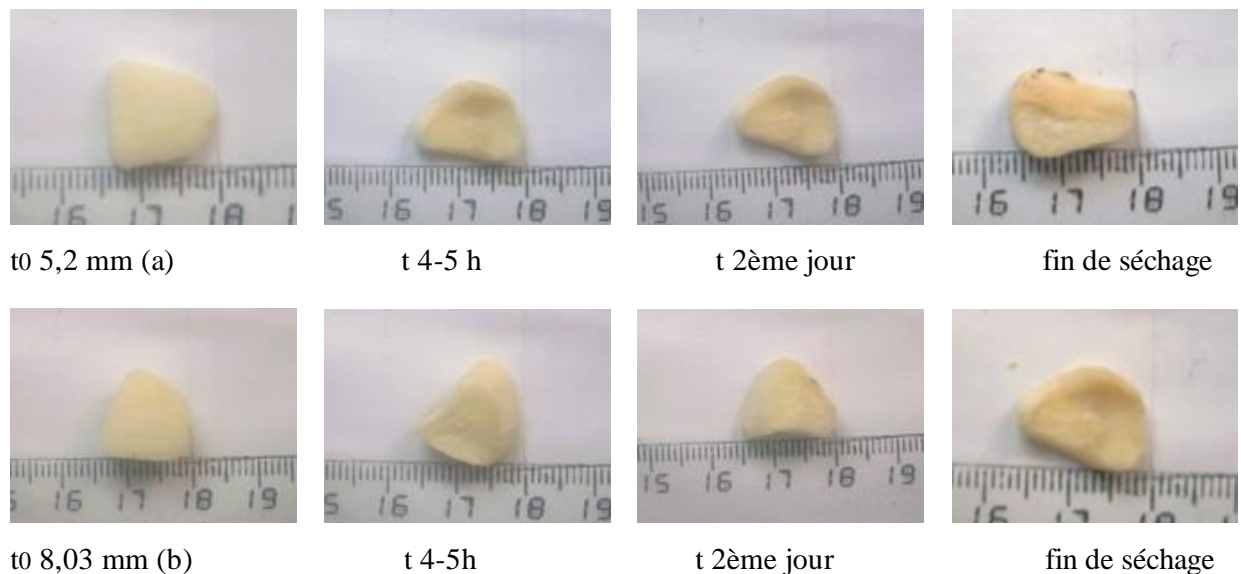


Figure 71 : Prises de vue de changement de forme et de couleur de tranches d'ail 5,2 (a) et 8,03 (b) mm d'épaisseur, séchées au séchoir solaire

Les photos montrent que les tranches rétrécissent avec une légère déformation dès le premier jour (entre 4 à 5 h de séchage) jusqu'au deuxième jour. En fin de séchage les deux tranches de 5,2 et 8,03 présentent un léger brunissement qui accompagne le rétrécissement. Cependant le produit garde une qualité acceptable par rapport à celui séché au sécheur armoire.

6-4-4- Discussion et conclusion

Les deux tranches démarrent à des vitesses de séchage initiales différentes avec des teneurs en eau X_{mi} à 15 et 30 min où celle de 5,2 mm est plus faible que celle de 8,03 mm.

La teneur en eau finale atteinte par la tranche de 5,2 mm est plus faible que celle de 8,03 mm. La durée totale de séchage plus courte pour la petite épaisseur (15h) que celle de la plus épaisse (20 h).

Les points d'inflexions montrent une première sous phase relative à l'évaporation de l'eau des capillaires (faiblement liée) avec une quantité éliminée moins élevée avec 5,2 mm en un temps très court que celle de 8,03 mm dont la durée est de 4,5 fois plus élevée .

La deuxième sous phase est plus longue avec diminution de la vitesse de séchage et la quantité d'eau évaporée est plus importante chez la petite épaisseur que celle de la plus épaisse en une durée presque égale .Elle correspond à l'élimination de l'eau de plus en plus liée qui est difficile à extraire.

Nous pouvons conclure que l'épaisseur de 5,2 mm est plus intéressante à sécher dans ce type de séchoir solaire. L'effet de l'épaisseur est très significatif sur la cinétique et vitesse de séchage.

7- Séchage et comportement de l'oignon

7-1- Cinétique de séchage

7-1-1- Effet de la température sur la cinétique et la vitesse de séchage

L'effet de la température de l'air sur la cinétique des vitesses de séchage des rondelles d'oignon est exprimé par des courbes, montrant l'influence de ce paramètre sur le comportement de chaque rondelle en fonction de sa dimension. Les figures 72a et 73a de la cinétique de séchage $X_m = f(t, m)$ sont présentées en annexe 1.

Les figures 72 (b et c) et 73 (b et c) représentent l'évolution de la vitesse de séchage $dX/dt=f(t_m)$ et $dX/dt=f(X_m)$ de l'oignon et montrent l'effet de chaque température de séchage (60 ; 70 et 85°C) sur chacune des deux épaisseurs de découpe ($6,0\pm 0,1$ et $8,3\pm 0,3$ mm).

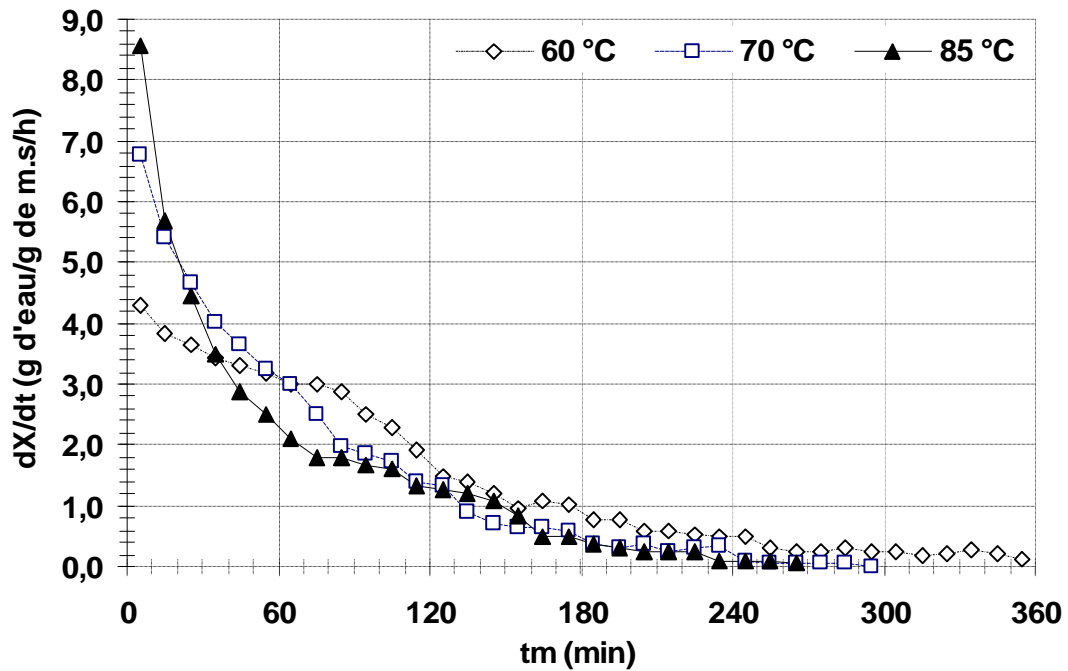
L'allure générale des courbes de cinétique et des vitesses de séchage (figures 72 et 73) montre que le séchage se déroule en phase décroissante, en l'absence de la période de mise en température et de la période à allure constante. Ce phénomène est rapporté en littérature à propos des produits alimentaires, notamment les légumes.

La présence d'une seule phase à allure décroissante montre qu'elle peut être subdivisée en deux ou trois sous périodes selon la température de l'air et l'épaisseur des rondelles.

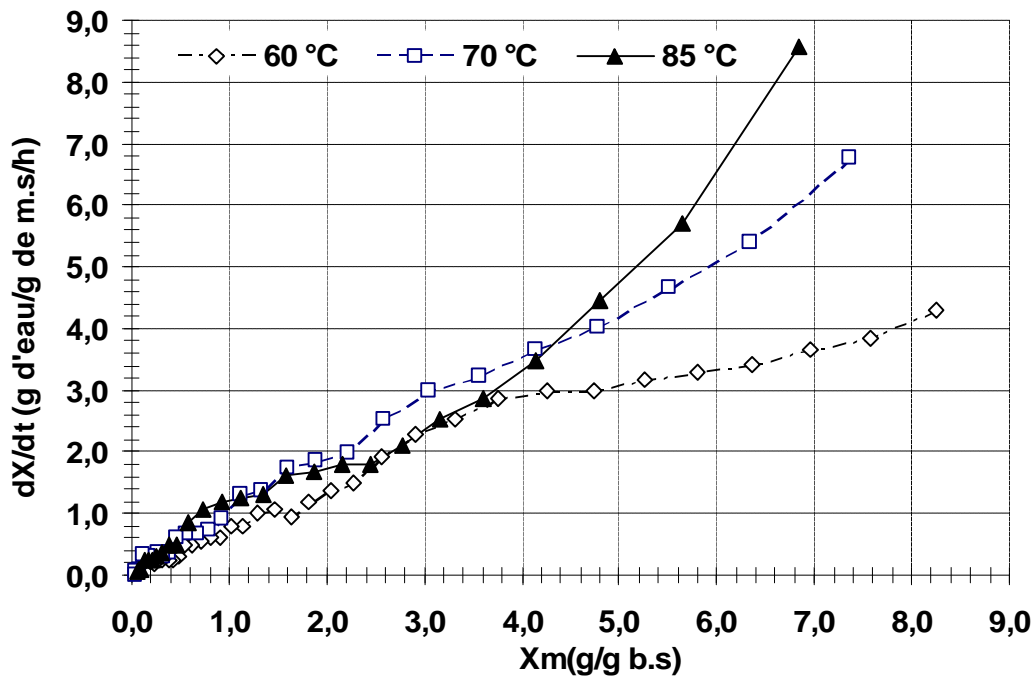
►► Sur les figures 72 b et c de l'épaisseur $6,0\pm 0,1$ mm, les courbes démarrent au temps initial ($t_{mi} = 5$ min) avec des vitesses initiales $(-dX/dt)_i$ de séchage différentes où celle de 85 °C est la plus élevée avec 8,56 g d'eau/g m.s/ h correspondant à une teneur en eau initiale X_{mi} de 6,83 g/g b.s (87,23 % b.h), suivie par celle de 70 °C avec 6,77 g d'eau/g m.s/h et une X_{mi} de 7,36 g/g b.s (88,04 % b.h) et enfin la température 60 °C a la plus faible vitesse initiale 4,29 g/g m.s/h correspondant à X_{mi} de 8,26 g/g b.s (89,2 % b.h).

Les trois courbes évoluent séparément à des vitesses et teneurs en eau initiales différentes montrant l'importance de l'effet de la température de l'air sur ces rondelles jusqu'aux teneurs en eau résiduelles à partir des environs de 0,5 g/g b.s à la fin du séchage.

Au cours du séchage les trois courbes de 60 ; 70 et 85 °C évoluent de façon séparée du début du séchage jusqu'aux basses teneurs en eau. Dans la figure 72 b, il apparaît que les courbes de 85 et 70°C se rapprochent au cours du séchage à 105min sans se confondre où



b : Vitesse de séchage de rondelles d'oignon de 6,0 mm d'épaisseur; $dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de rondelles d'oignon de 6,0 mm d'épaisseur ; $dX/dt = f(X_m)$

Figure 72 : Effet de la température sur la vitesse de séchage des rondelles d'oignon de 6,0 mm d'épaisseur ; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

l'effet de la température s'atténue quelque peu jusqu'à t_m 125min où il s'accroît.

Cette partie montre que le séchage se déroule à des vitesses rapprochées, ensuite la décroissance devient plus rapide à 70 °C qu'à 85 °C. Au contraire sur la figure 72 c, il apparaît que l'effet est diminué entre les courbes de 60 et 85 °C qui se rapprochent à des teneurs en eau de 3,3 et 2,45g/g b.s puis l'effet devient important où celle de 60 °C montre une décroissance plus importante.

► Les courbes de séchage des températures de 60 °C montrent qu'à Δt 5h55min (355 min), et 4h05min (245min) pour celle de 70 et 85 °C, les rondelles atteignent la teneur en eau moyenne sur base sèche $X_{m1} < 10$ g/g b.s, $X_{m1} = 0,083$; 0,085 et 0,086 g/g b.s (7,66; 7,83 et 7,92% sur b.h) respectivement. Cette durée est suffisante pour éliminer ΔX_{m1} de 8,18; 7,28 et 6,748 g d'eau /g de masse sèche soit 89,11; 87,92 et 87,09 % sur base humide de la totalité de l'eau contenue dans l'oignon.

La teneur en eau moyenne finale est atteinte après 50 et 10min de plus pour éliminer respectivement 5,1 et 3,0 % b.s (4,85 et 2,91% b.h) d'eau restante de X_{m1} jusqu'à X_{mf} 0,034 et 0,057 g/g b.s (3,29 et 5,39 % b.h) respectivement pour 70 et 85 °C. Le séchage est arrêté à la teneur en eau X_m de 0,083 g/g b.s (7,66 % b.h) à 60 °C.

Le temps Δt de 5 h55; 4h 55 min et 4h 25 min (355; 295 et 265 min) correspond à l'évaporation de ΔX_{mt} 8,18; 7,33 et 6,777g d'eau /g de m.s soit 89,11 ; 88,00 et 87,14 % b.h (g d'eau évaporée par 100 g de masse humide) au cours du séchage de ces rondelles d'oignon de 6,0 mm d'épaisseur.

L'effet de la température apparaît important par la durée de séchage respective qui est plus courte à 85 °C que pour les deux autres.

► Le changement de pente est observé (figure 72 b et 72 c) à 85min (60 °C); à 65min (70 °C) et 45min (85 °C) de séchage qui correspond à X_m de 3,76 ; 3,05 et 3,61 g/g b.s (78,99 ; 75,31 et 78,31 % b.h) et à une vitesse de 2,88 ; 3,00 et 2,88g d'eau/g m.s/h respectivement. Ces points correspondent à l'évaporation de 4,50; 4,31 et 3,22 g/g b.s soit 81,81 ; 81,17 et 76,30 % sur base humide.

La vitesse de séchage montre une évaporation plus élevée au début avec $(-dX/dt)_i$ élevée jusqu'au point d'inflexion avec changement de l'allure de la courbe et abaissement de la vitesse au fur et à mesure que la teneur en eau résiduelle diminue

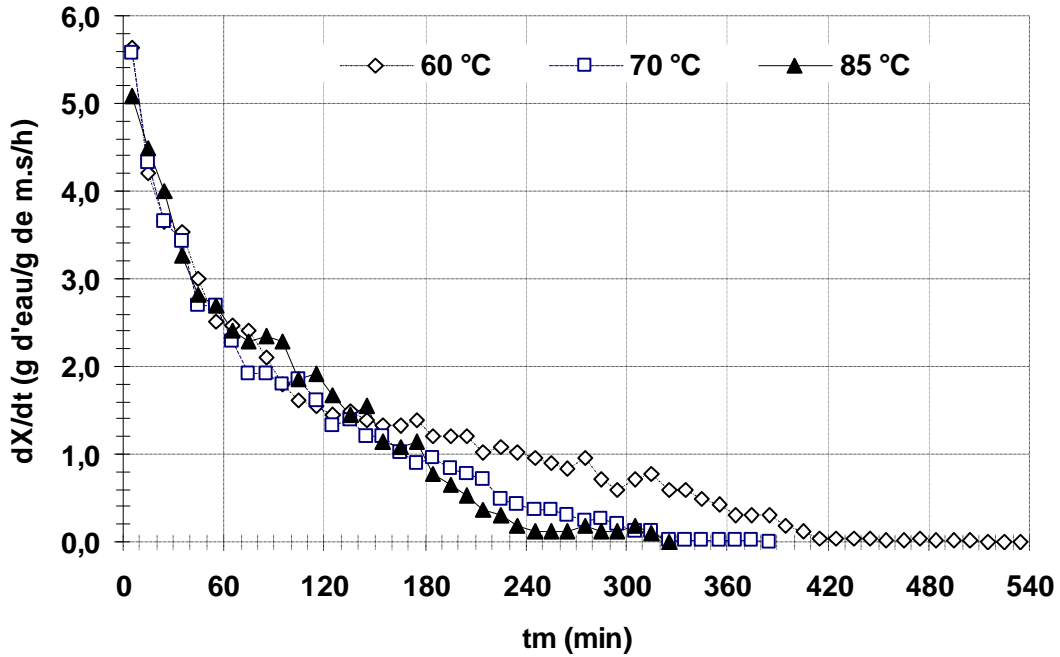
La diminution de la quantité d'eau évaporée, exprimée par la faible vitesse à partir de ce changement de pente, nécessite une durée plus longue jusqu'à X_{mf} qui est de 4h 30min (270min) à 60 °C; 3h 20 (230 min) à 70 °C et 3h 10 min (220 min) à 85 °C pour évaporer 78,63 ; 75,12 et 78,02 % sur base humide. Ce temps correspond à 76,1 ; 78,0 et 83,0 % de la durée totale respective (60 et 70 °C, et 85°C) du séchage.

►► Les courbes des figures 73 b et c de l'épaisseur $8,3 \pm 0,3$ mm, démarrent au temps initial ($t_{mi} = 5$ min) avec des vitesses initiales $(-dX/dt)_i$ de séchage différentes où celle de 60 °C est la plus élevée avec 5,63 g d'eau/g m.s/ h correspondant à une teneur en eau initiale X_{mi} de 9,52 g/g b.s (90,49 % b.h), suivie par celle de 70 °C avec 5,57 g d'eau/g m.s/h et une X_{mi} de 7,46 g/g b.s (88,18 % b.h) et enfin la température 85 °C démarre avec une plus faible vitesse initiale de 5,09 g/g m.s/h correspondant à X_{mi} de 7,50 g/g b.s (88,23 % b.h).

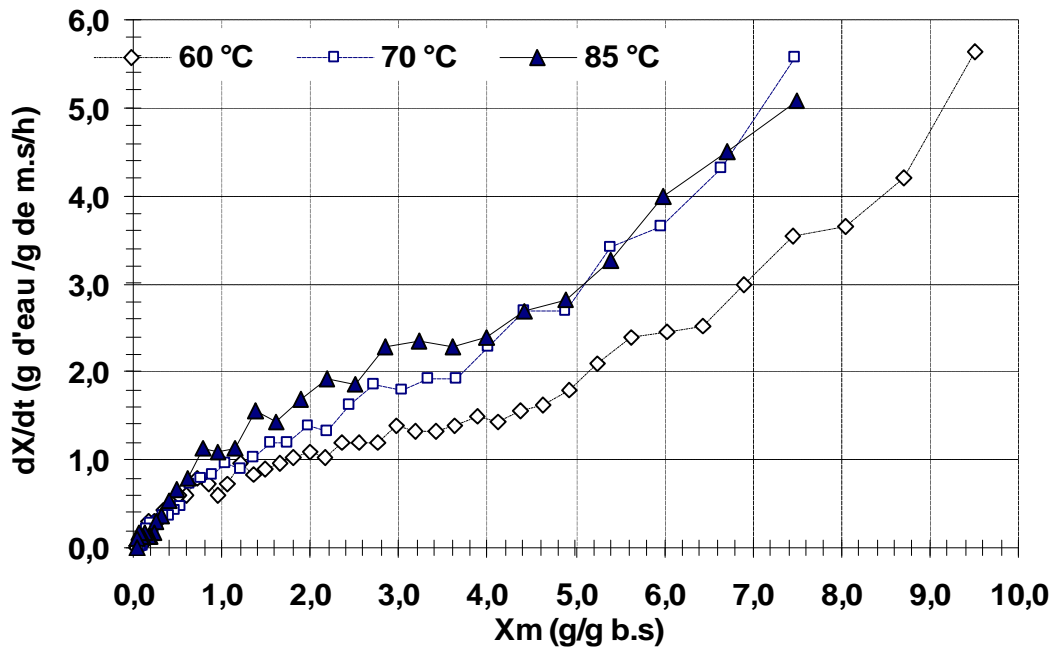
Les trois courbes évoluent séparément à des vitesses et teneurs en eau initiales différentes mais inversées entre la plus élevée et la plus faible des températures de l'air où l'effet de ce paramètre n'est pas significatif à ce niveau sur ces rondelles.

Dans la figure 73 b, il apparaît que les vitesses des trois courbes se rapprochent du début du séchage jusqu'à 65 min où l'effet de la température s'atténue quelque peu. Au cours du séchage (figure 73 c) les courbes de 70 °C et 85°C évoluent de façon séparée de celle de 60 °C qui à partir d'une teneur en eau de 7,5 g/g b.s (88,23 % b,h) évolue avec des vitesses de séchage nettement inférieures à celles des deux autres courbes. Cependant, ces dernières se chevauchent dès le début du séchage jusqu'à la teneur en eau d'environ 4,0 g/g b.s (80 % b,h) où elles se séparent et la température reprend son effet jusqu'à la fin du séchage.

Cette partie montre que le séchage se déroule à des vitesses rapprochées, ensuite la vitesse d'évaporation est plus importante à 85 °C qu'à 70 °C jusqu'à la fin du séchage.



b : Vitesse de séchage de rondelles d'oignon de 8,3 mm d'épaisseur; $dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de rondelles d'oignon de 8,3 mm d'épaisseur; $dX/dt = f(X_m)$

Figure 73 : Effet de la température sur la vitesse de séchage de rondelles d'oignon de 8.3 mm d'épaisseur : (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

► La courbe de séchage de la température de 60 °C montre qu'à Δt 6h55min (415min), 5h25 min (325min) pour celle de 70 °C et 4 h55 min (295min) à 85 °C, les rondelles atteignent la teneur en eau moyenne sur base sèche < 10 g/g b.s, $X_{m1}=0,096$; 0,098 et 0,09 g/g b.s (8,76; 8,92 et 8,26 % sur b.h) respectivement. Cette durée est suffisante pour éliminer ΔX_{m1} de 9,424 ; 7,367 et 7,414 g d'eau /g de masse sèche soit 90,41; 88,05 et 88,11 % sur base humide de la totalité de l'eau contenue dans l'oignon qui est à l'état initial de 90,9 % b.h (9,99 g/g b.s) pour 60 °C; 88,8 % b.h (7,93 g/g b.s) pour 70 et 85 °C.

La teneur en eau moyenne finale est atteinte après 2h (120 min); 1h (60min) et 30 min de plus pour éliminer respectivement 5,6 ; 2,4 et 5,8 % b.s (5,3 ; 2,34 et 5,48 % b.h) d'eau restante de X_{m1} jusqu'à X_{mf} de 0,04 ; 0,073 et 0,032 g/g b.s (3,85 ; 6,8 et 3,1 % b.h) respectivement à 60 ; 70 et 85 °C.

Le temps Δt de 8h 55min ; 6h 25 min et 5h 25 min (535; 385 et 325 min) correspond à l'évaporation de ΔX_{mt} 9,48; 7,391 et 7,472 g d'eau /g de m.s soit 90,46 ; 88,08 et 88,21 % b.h (g d'eau par 100 g de masse humide) au cours du séchage des rondelles d'oignon de 8,3 mm d'épaisseur.

L'importance de l'effet de la température apparaît dans la durée de séchage respective qui est plus courte à 85 °C que pour les deux autres.

► Le changement de pente est observé (figure 73 b et 73 c) à 1h 45min (60 °C); à 1h 15 min (70 °C) et 1h05min (85 °C) de séchage qui correspond à X_m de 4,64 ; 3,66 et 4,00 g/g b.s (82,27 ; 78,54 et 80,0 % b.h) et à une vitesse de 1,62 ; 1,92 et 2,40 g d'eau/g m.s/h respectivement. Ces points correspondent à l'évaporation de 4,89; 3,80 et 3,50 g/g b.s soit 83,02 ; 79,17 et 77,78 % sur base humide.

La vitesse de séchage montre une évaporation plus élevée au début avec $(-dX/dt)_i$ élevée jusqu'au point d'inflexion avec changement de l'allure de la courbe et abaissement de la vitesse au fur et à mesure que la teneur en eau résiduelle diminue

La diminution de la quantité d'eau évaporée, exprimée par la faible vitesse à partir de ce changement de pente, nécessite une durée plus longue jusqu'à X_{mf} qui est de 7h 10min (430min) à 60 °C; 5h 10 (310 min) à 70 °C et 4h 20 min (260 min) à 85 °C pour évaporer 82,14 ; 78,21 et 79,88 % sur base humide. Ce temps correspond à 80,4 ; 80,5 et 80,0 % de la durée totale respective (60 et 70 °C, et 85°C) du séchage.

7-1-2- Effet de la dimension sur la cinétique et la vitesse de séchage

Les figures 74 a et 76 a de la cinétique de séchage $X_m = f(t_m)$ sont présentées en annexe 1.

►► Pour montrer l'effet de la taille de découpe sur les cinétiques et vitesses de séchage des rondelles séchées à 60 °C, la figure 74 (b et c) montre un effet important où les courbes des deux épaisseurs évoluent distinctement l'une de l'autre avec des vitesses initiales différentes de 4,29 et 5,63 g/g m.s/h correspondant à des teneurs en eau initiales ($t_{mi} = 5$ min) de 8,26 et 9,52 g/g b.s (89,2 et 90,49 % b.h).

Il ressort que la vitesse la plus élevée est assurée par l'épaisseur la plus large (8,3 mm) et la plus faible est assurée par l'épaisseur fine 6,0 mm. La durée de séchage suffisante pour atteindre X_{m1} et X_{mf} est plus courte avec 6,0 mm et celle de 8,3 mm est plus longue.

Le temps mis à atteindre le point d'inflexion est plus court 1h 25 min (85 min) avec 6,0 mm pour une quantité d'eau évaporée (4,50 g/g b.s soit 81,81 % b.h) moins élevée que celles de l'épaisseur 8,3 mm qui assure un temps de 1h 45 min (105 min) et ΔX_m plus important (4,89 g/g b.s soit 83,02 % b.h).

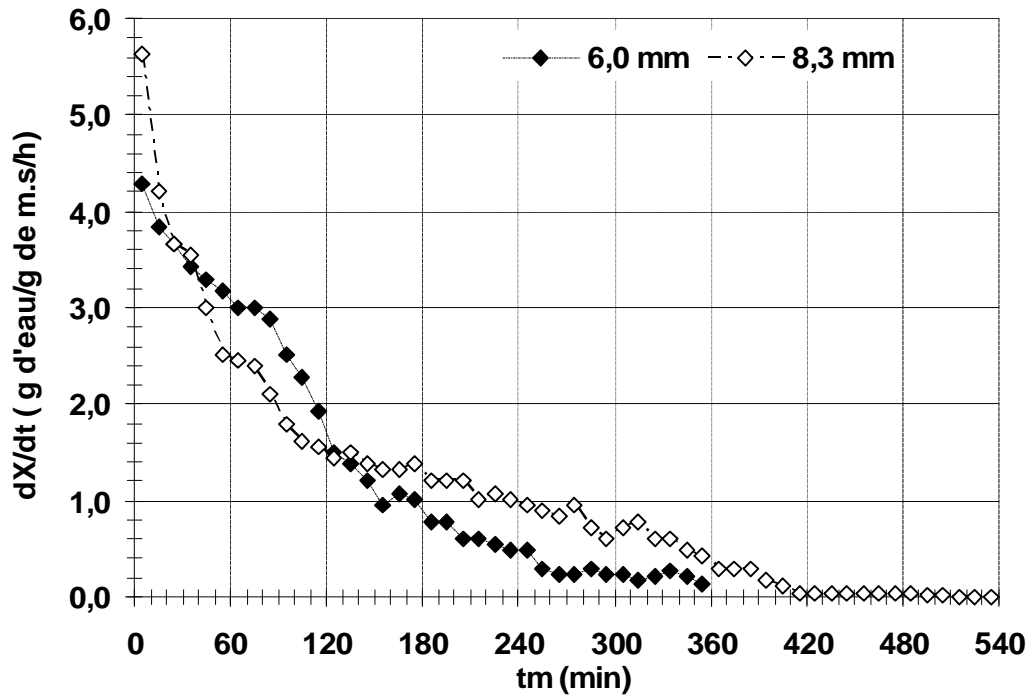
La difficulté d'extraire la quantité d'eau restante après le point de changement de pente est apparente chez l'épaisseur large de 8,3 mm que chez l'autre de 6,0 mm. En 7h10 min il est évaporée 4,60 g/g b.s (82,14 % b.h) avec 8,3 mm à comparer avec celle de 6,0 mm qui assure une évaporation de 3,68 g/g b.s (76,63 % b.h) en 4h 30 min seulement. Les temps respectifs de cette évaporation représentent 80,4 et 76,1 % de la durée totale du séchage jusqu'à X_{mf} .

►► la figure 75 (a , b et c) montre l'effet de la taille de découpe sur les cinétiques et vitesses de séchage des rondelles séchées à 70 °C, qui est important où les courbes des deux épaisseurs évoluent distinctement l'une de l'autre avec des vitesses initiales différentes de 6,77 et 5,57 g/g m.s/h correspondant à des teneurs en eau initiales à $t_{mi} = 5$ min de 7,36 et 7,46 g/g b.s (88,04 et 88,18 % b.h).

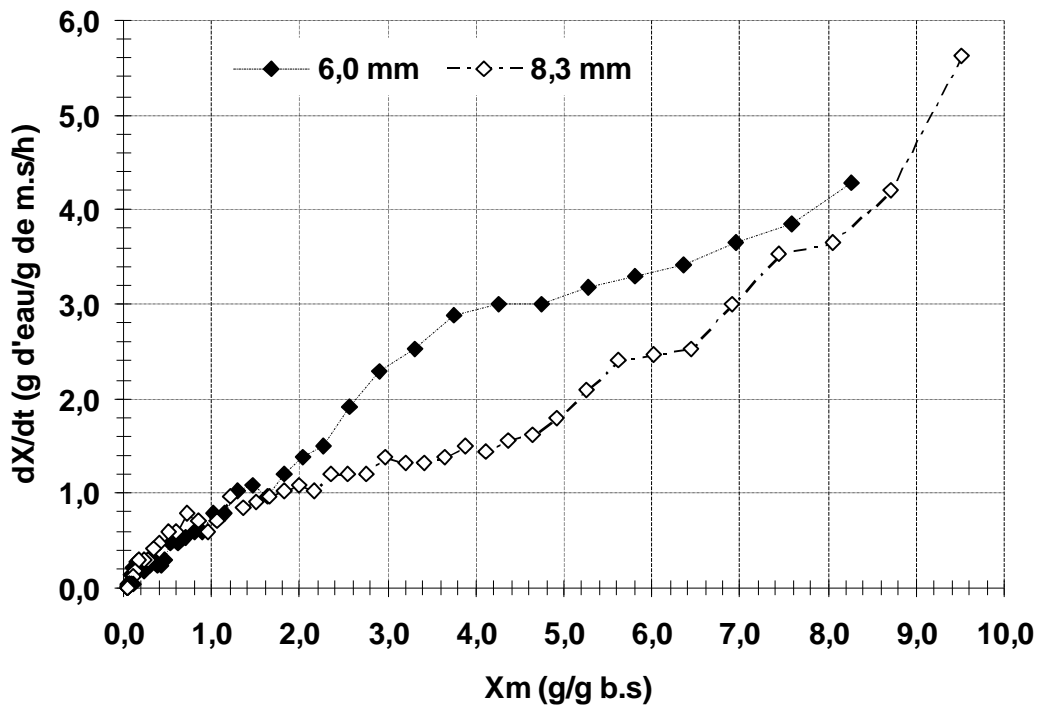
Il ressort que la vitesse la plus élevée est assurée par la petite épaisseur (6,0 mm) et la plus faible est assurée par l'épaisseur 8,3 mm.

La durée de séchage suffisante pour atteindre X_{m1} et X_{mf} est plus courte avec 6,0 mm et celle de 8,3 mm est plus longue.

Le temps mis à atteindre le point d'inflexion est plus court 1h 05 min (65 min) avec 6,0 mm pour une quantité d'eau évaporée (4,31 g/g b.s soit 81,17 % b.h) plus élevée que celle de



**b : Vitesse de séchage de rondelles d'oignon à 60°C ;
dX/dt = f(tm)**



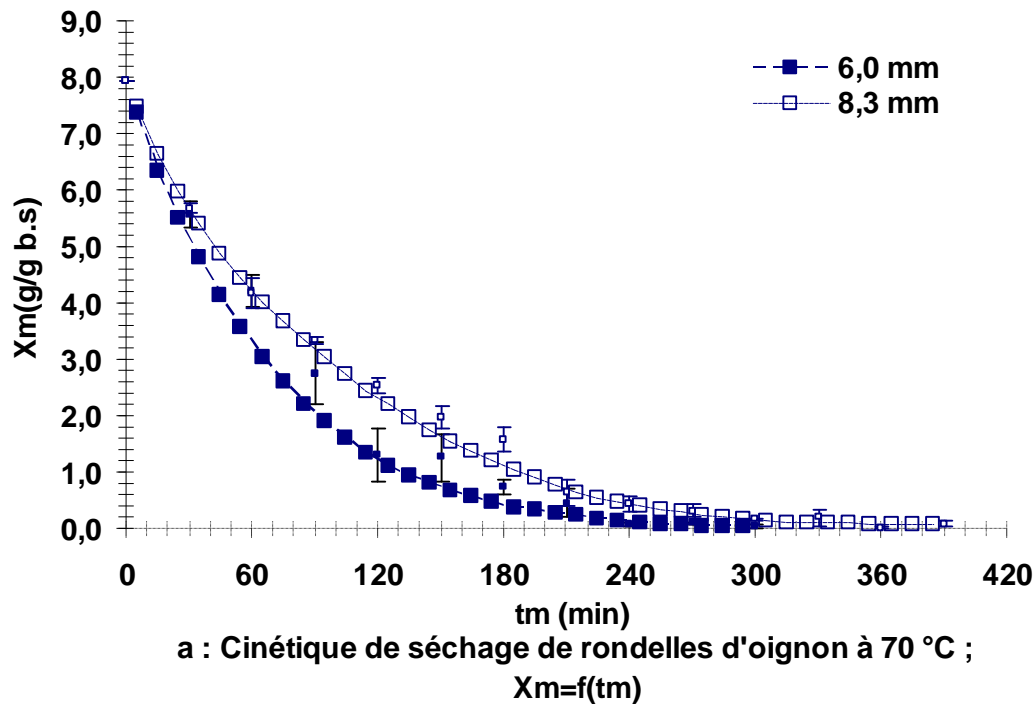
**c : Vitesse de séchage de rondelles d'oignon à 60°C ;
dX/dt = f(Xm)**

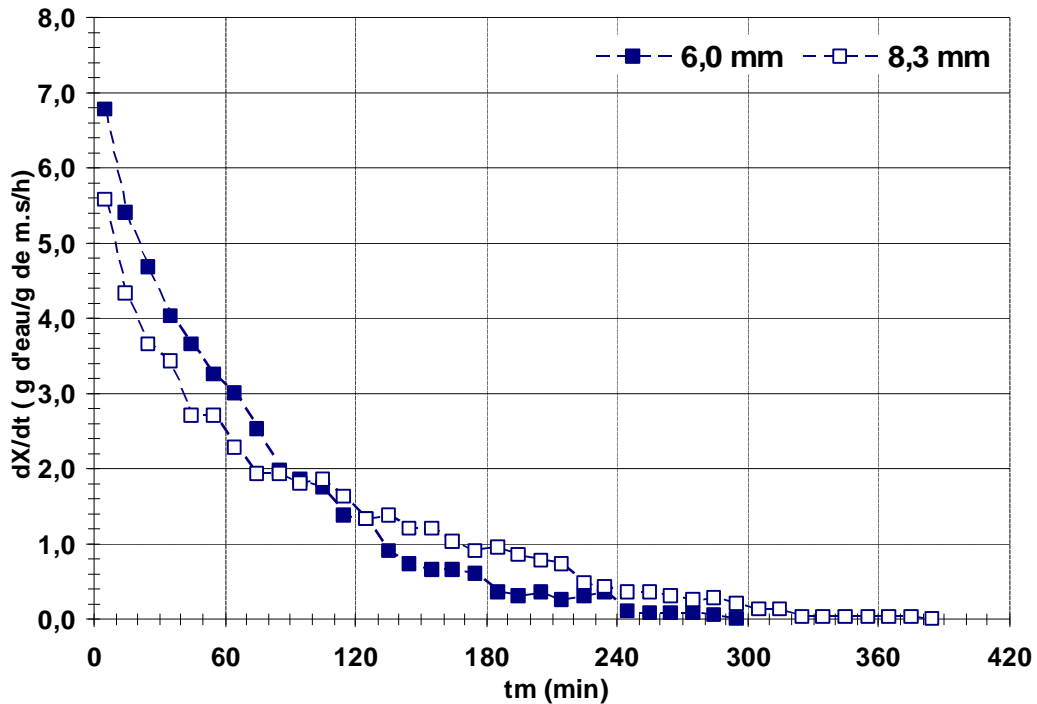
Figure 74 : Effet de la taille de découpe sur la vitesse de séchage de rondelles d'oignon séchées à 60 °C: (b) $-dX/dt = f(tm)$ et (c) $-dX/dt = f(Xm)$

l'épaisseur 8,3 mm qui assure un temps de 1h 15 min (75 min) et ΔX_m moins important (3,80 g/g b.s soit 79,17 % b.h).

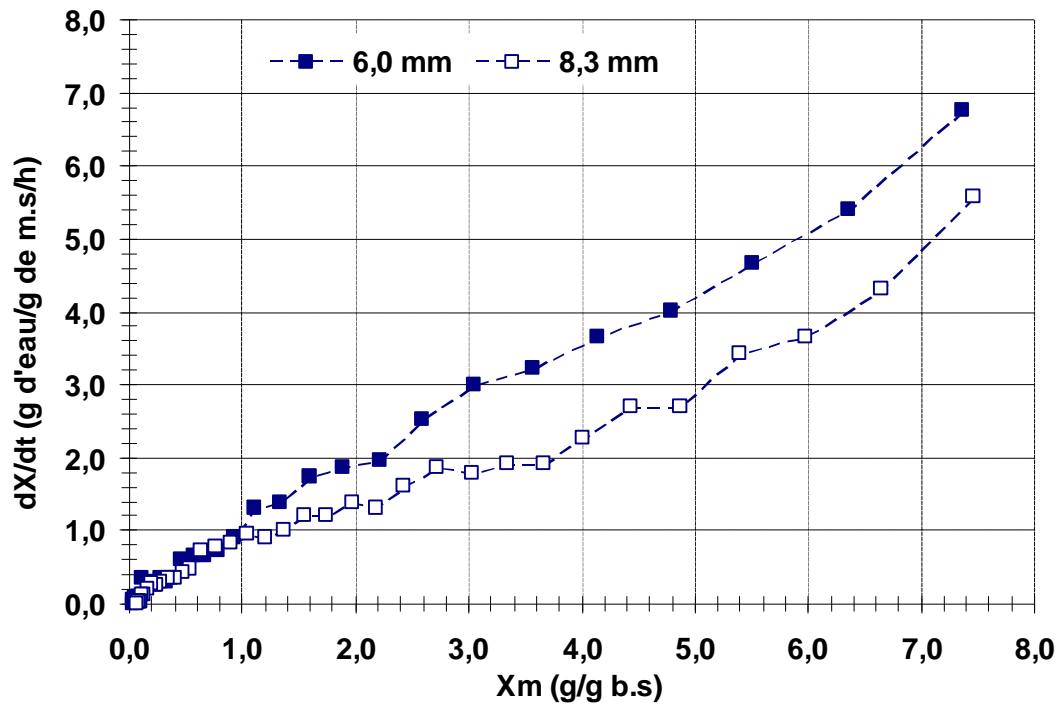
La difficulté d'extraire la quantité d'eau restante après le point de changement de pente est apparente chez l'épaisseur large de 8,3 mm que chez l'autre de 6,0 mm. En 5h10 min il est évaporée 3,59 g/g b.s (78,21 % b.h) avec 8,3 mm à comparer avec celle de 6,0 mm qui assure une évaporation de 3,02 g/g b.s (75,12 % b.h) en 3h 20 min seulement. Les temps respectifs de cette évaporation représentent 80,5 et 78,1 % de la durée totale du séchage jusqu'à X_{mf} .

►► La figure 76 (b et c) montre l'effet de la taille de découpe sur les cinétiques et vitesses de séchage des rondelles séchées à 85 °C, où les courbes des deux épaisseurs évoluent distinctement l'une de l'autre avec des vitesses initiales différentes de 8,56 et 5,09 g/g m.s/h correspondant à des teneurs en eau initiales à t_{mi} 5 min de 6,83 et 7,50 g/g b.s (87,23 et 88,23 % b.h). Il ressort que la vitesse la plus élevée est assurée par la petite épaisseur (6,0 mm) et la plus faible est assurée par l'épaisseur 8,3 mm.



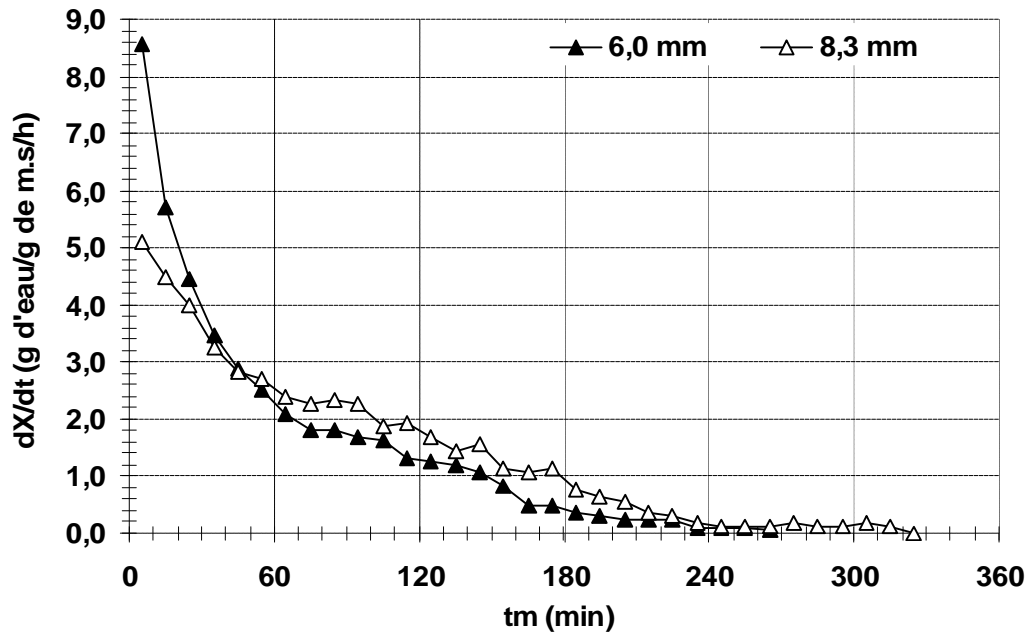


**b : Vitesse de séchage de rondelles d'oignon à 70°C ;
dX/dt = f(tm)**

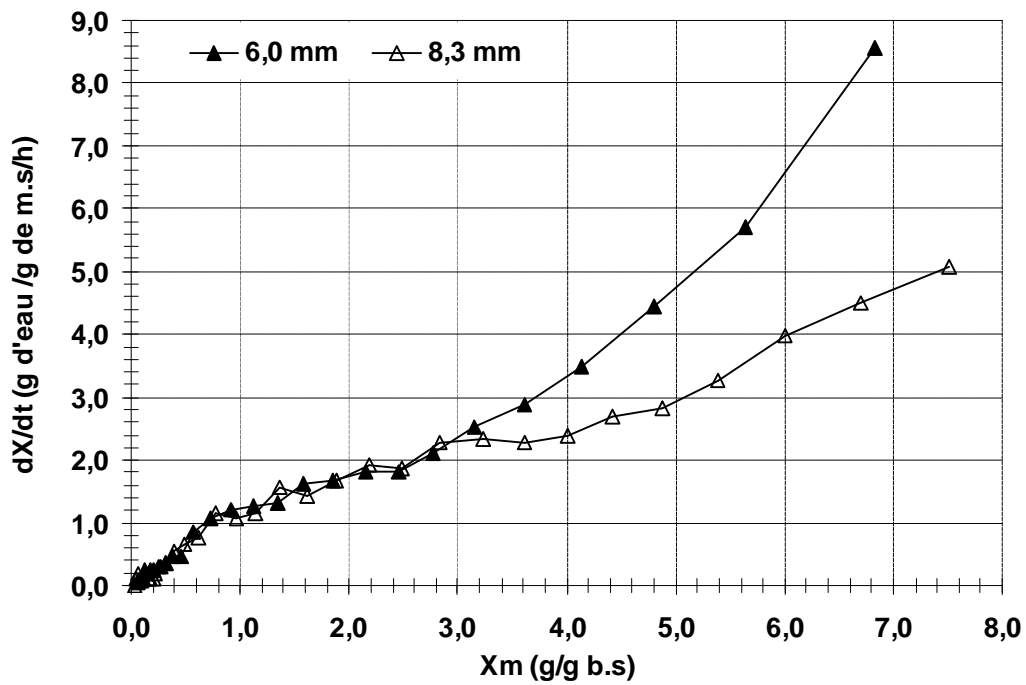


**c : Vitesse de séchage de rondelles d'oignon à 70 °C ;
dX/dt =f(Xm)**

Figure 75 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage de rondelles d'oignon séchées à 70 °C; (a) $X_m = f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$



b : Vitesse de séchage de rondelles d'oignon à 85 °C ;
 $dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage de rondelles d'oignon à 85 °C ;
 $dX/dt = f(X_m)$

Figure 76 : Effet de la taille de découpe sur la vitesse de séchage de rondelles d'oignon séchées à 85 °C ; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

La durée de séchage suffisante pour atteindre X_{m1} et X_{mf} est plus courte avec 6,0 mm (4h 30min) et celle de 8,3 mm est plus longue (5h 30 min). Le temps mis à atteindre le point d'inflexion est plus court (45 min) avec 6,0 mm pour une quantité d'eau évaporée (3,22 g/g b.s soit 76,3 % b.h) moins élevée que celles de l'épaisseur 8,3 mm qui assure un temps de 1h 05 min (65 min) et ΔX_m plus important (3,50 g/g b.s soit 77,78 % b.h).

Pendant à cette température il est observé sur la figure 76 c ($-dX/dt = f(X_m)$) une diminution de l'effet entre les deux courbes à partir de 2,28 g/g m.s/h et X_m de 2,8 g/g b.s soit 73,68 % b.h (après le point d'inflexion) jusqu'à la fin du séchage au cours de laquelle les deux vitesses et teneurs en eau sont rapprochées les unes des autres. Ce qui n'est pas remarqué sur la figure 76 b ($-dX/dt = f(t_m)$) qui montre que les courbes évoluent distinctement l'une de l'autre jusqu'à $X_m < 0,4$ g/g b.s (28,6% b.h) ni sur la figure 76 a (voir annexe 2) où l'évolution des deux courbes est distincte (malgré des écart types assez rapprochés) en fin du séchage.

La difficulté d'extraire la quantité d'eau restante après le point de changement de pente est apparente chez l'épaisseur large de 8,3 mm que chez l'autre de 6,0 mm. En 4h20 min il est évaporée 3,97 g/g b.s (79,88 % b.h) avec 8,3 mm à comparer avec celle de 6,0 mm qui assure une évaporation de 3,55 g/g b.s (78,02 % b.h) en 3h 10 min seulement. Les temps respectifs de cette évaporation représentent 80,0 et 83,0 % de la durée totale du séchage jusqu'à X_{mf} .

7-1-3- Discussion et conclusion

Les courbes de cinétique et vitesse de séchage de rondelles d'oignon coupée en deux épaisseurs, séchées à trois températures (60,70 et 85 °C), montrent l'absence de phase de séchage constante. L'évolution du séchage s'effectue en phase à allure de séchage décroissante, qui est divisée en deux sous phases selon la température et l'épaisseur des rondelles.

Cette phase constante n'est pas observée dans les produits biologiques, même lorsqu'il s'agit de produits dont l'humidité initiale est très importante (produits végétaux, produits carnés) (BIMBENET ,1984 ; CHARREAU et CAVAILLÉ, 1991; ZIDOUNE ,2002).

SARSAVADIA et *al.*, (1999), lors du séchage de l'oignon rapporte l'absence de cette phase constante.

DAUDIN et BIMBENET (1982) rapportent qu'ils n'ont jamais observé de période à allure constante, même dans les conditions où le séchage était faible. Cette constatation est faite pour le séchage d'autres produits biologiques, parfois même très hydratés.

LESCANO (1983), Lors du séchage à l'air chaud de la pomme de terre rapporte l'absence de la période de séchage à régime constant et l'existence de plus de trois périodes à régime décroissant. L'auteur rapporte que les modifications physiques et chimiques causées affectent également les taux de séchage. La forme et les dimensions du produit mis à sécher influent aussi sur le processus.

Le séchage de rondelles d'oignon ne présente que des périodes de séchage à régime décroissant; celles de 6,0 mm, séchant à deux vitesses (ou sous phases) de décroissance, avec une première sous phase rapide relative au départ de l'eau faiblement liée et une deuxième sous phase ralentie, jusqu'à la fin du séchage. Leur durée de séchage aux trois températures est assez courte et celles séchées à 85 °C assurent le temps le plus court des trois températures par rapport à celles de 8,3 mm qui est plus longue.

La petite épaisseur assure des vitesses de séchage plus élevées à 70 et 85 °C que celles de la plus épaisseur. L'effet de la température paraît moins important avec l'épaisseur large dont les courbes se chevauchent minimisant son influence.

L'effet de la température paraît plus intéressant sur les cinétiques et vitesses de séchage par rapport à la première sous phase où la quantité d'eau évaporée correspondant à l'eau moins liée est assurée par la température la plus élevée et la plus fine des épaisseurs. Il est montré aussi que la deuxième sous phase de décroissance qui correspond à l'eau de plus en plus liée plus difficile à évaporer est plus lente dont les durées respectives sont comprises entre 76 et 83 % de la durée totale du séchage.

L'influence de l'épaisseur des rondelles d'oignon sur la cinétique de séchage est très importante, ce qui est montré sur les figures 74 à 76 où les courbes de cinétique et de vitesse des deux épaisseurs séchées à la même température évoluent de manière distincte. La plus fine séchant plus rapidement que la plus épaisse.

L'importance de l'effet de la taille de découpe associé à celui de la température de l'air de séchage montré par la majorité des courbes qu'il est significativement important.

7-1-4- Activité de l'eau (aw) de l'oignon frais et séché

L'oignon frais est râpé afin de permettre l'échange avec les solutions d'acide aux diverses HRE% jusqu'à équilibre durant six (6) jours (entre 104 et 144h). La masse initiale des prises d'essais est présentée avec les variations de masse dans le tableau 32 a.

Les rondelles utilisées pour la réalisation de la détermination de l'activité de l'eau ont été séchées trois (03) mois auparavant, conditionnées dans des sachets de polyéthylène thermo soudés et conservées à température ambiante du laboratoire.

Le mélange est obtenu à partir de rondelles de deux épaisseurs (6,0 et 8,3 mm) séchées à 60 ; 70 et 85 °C,. La teneur en eau finale moyenne est de $0,050 \pm 0,05$ g/g b.s (4,76 % b.h).

Le mélange est broyé en poudre, pesé et mis à l'intérieur des différents bocaux contenant les solutions d'acide sulfurique ayants des HRE variées. Les échantillons sont maintenus à température ambiante jusqu'à équilibre et stabilisation de leur poids durant cinq (5) jours. L'équilibre est atteint entre 72 à 91h.

La température moyenne mesurée au cours de la détermination de l'activité de l'eau de l'oignon à l'état frais est de $28 \pm 1,7$ °C et séché $23,7 \pm 0,7$ °C.

La moyenne de la variation de masse rapportée à la masse initiale en pourcentage des trois essais réalisés permet de donner les points pour tracer la courbe à partir de laquelle est tirée la valeur de l' a_w de nos échantillons.

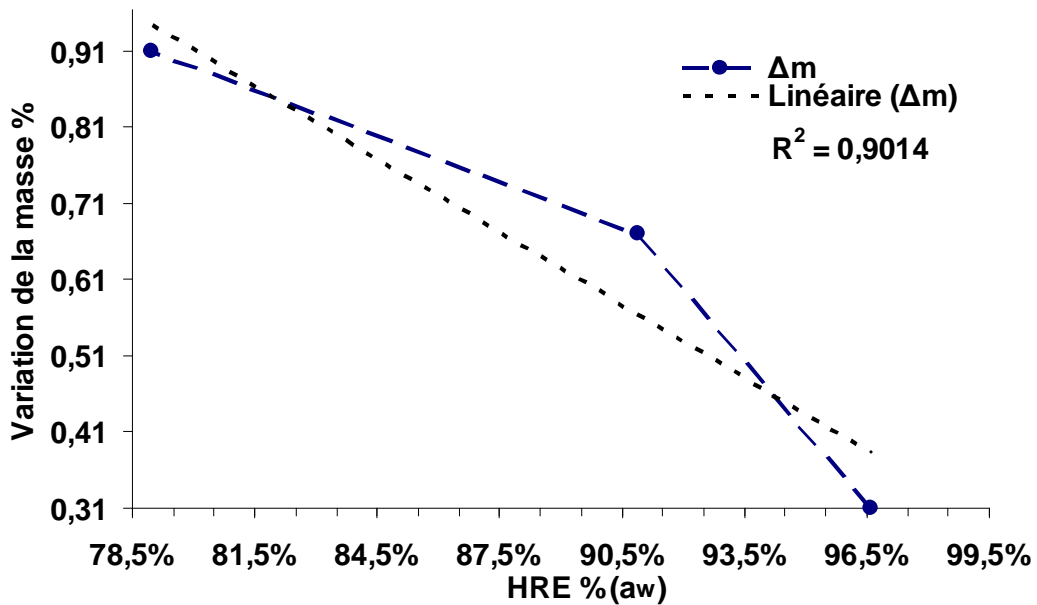
Les courbes de mesure de l'activité de l'eau de l'oignon frais et séché sont présentées dans la figure 77 a et b.

Tableau 32 a : Masse initiale moyenne et variation de masse des 3 essais de l'oignon frais

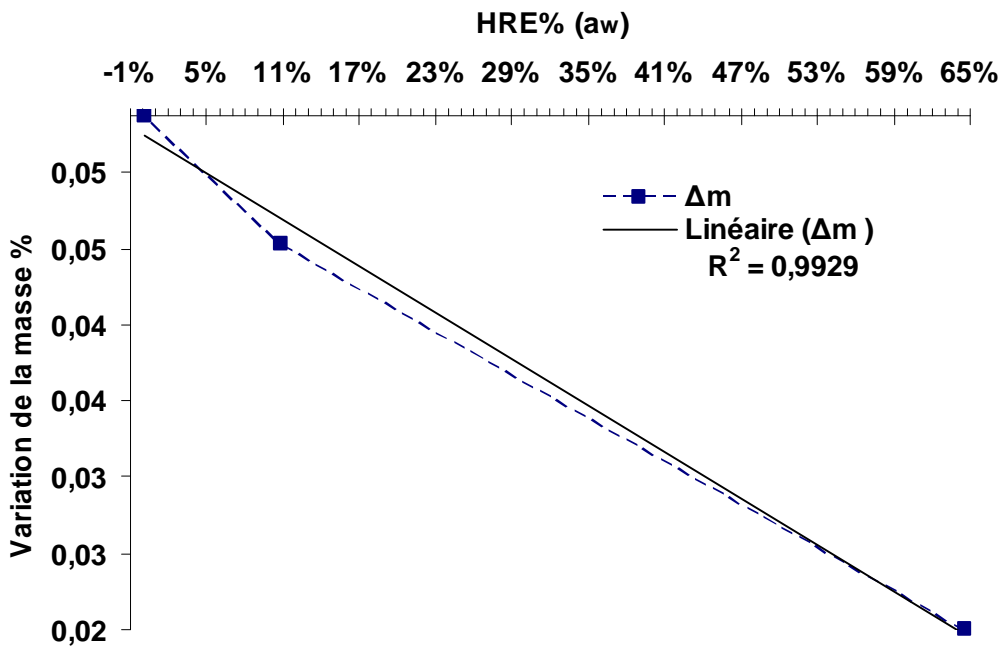
Concentration d'H ₂ SO ₄ % (v/v)	6	15	27	mi moyen (g)
HRE % à 25°C	96,60	90,91	78,97	
mi moyen (g)	$3,13 \pm 0,5$	$2,93 \pm 0,3$	$3,12 \pm 0,6$	$3,06 \pm 0,1$
$\Delta m = (mi - mf / mi) \%$	0,313	0,673	0,911	

Tableau 32 b : Masse initiale moyenne et variation de masse des 3 essais de l'oignon séché

Concentration d'H ₂ SO ₄ % (v/v)	36	64	88	mi moyen (g)
HRE % à 25°C	64,57	10,89	0,082	
mi moyen (g)	$0,76 \pm 0,06$	$0,82 \pm 0,32$	$0,81 \pm 0,37$	$0,80 \pm 0,03$
$\Delta m = (mi - mf / mi) \%$	0,020	0,045	0,054	



a : Mesure de l'activité de l'eau (aw) de l'Oignon frais
(aw = 0,965)



b : Mesure de l'activité de l'eau (aw) de l'Oignon séché
(aw = 0,053)

Figure 77 : Mesure de l'activité de l'eau de l'oignon à l'état frais et séché dans des solutions de H₂SO₄ à HRE variées

NOUMI et coll. (2003), dans leur étude sur les isothermes de désorption d'eau sur les pulpes de l'aïélé rapportent que la teneur en eau d'équilibre des produits alimentaires est très importante puisqu'elle est en relation étroite avec le mode de stockage et les problèmes de séchage des dits produits (HENDERSON, 1952 cité par NOUMI et coll. 2003). L'étape importante dans tout procédé de séchage d'un produit consiste à évaluer son caractère hygroscopique ; ce caractère traduit l'affinité que peut avoir le matériau avec son milieu environnant. Ceci se matérialise par des courbes indiquant pour une température donnée, la teneur en eau à l'équilibre (X_e) dans un produit en fonction de l'HR de l'air qui l'entoure (BIZOT et *al.*, 1987 ; cités par NOUMI et coll. 2003).

Elles permettent de tirer des informations utiles d'une part sur l'aspect de stockage et d'autre part sur l'aspect de séchage du produit

La détermination de la valeur de l'activité de l'eau est obtenue graphiquement à partir des courbes tracées pour chaque essai, avec ajustement par une droite linéaire, qui coupe l'axe des HRE au point correspondant à l'équilibre.

La figure 77 a montre le point d'intersection qui permet d'obtenir la valeur de l' a_w de l'oignon frais qui se situe approximativement à la valeur de 0,965.

La figure 77 b montre le point d'intersection de la moyenne de trois essais qui est situé à la valeur de $0,053 \pm 0,003$.

Ainsi l'oignon avec une teneur en eau initiale moyenne de $89,3 \pm 0,9$ % sur base humide ($X_i = 8,52 \pm 0,93$ g/g b.s) aurait une activité de l'eau a_w voisine de 0,965. Les rondelles séchées aux teneurs en eau moyenne de 0,050 g/g b.s auraient une activité de l'eau (a_w) voisine de 0,053. Ce niveau d'activité compris entre 0 et 0,2 correspond aux forces de liaisons très intenses empêchant le mouvement moléculaire de s'exprimer (MAFART, 1991), permet une durée de conservation de nos échantillons relativement longue, dans les conditions de température ambiante (25 ± 3 °C).

BIMBENET et coll. (2002 b), rappelant que l'objectif de sécher un produit est d'abaisser sa teneur en eau de telle sorte que son activité de l'eau soit portée à une valeur permettant sa conservation à température ordinaire sur de longues durées (de l'ordre de l'année).

Les teneurs en eau atteintes par le séchage de l'oignon permettent sa conservation pour une durée approximative d'une année.

ROUX (1994), rapporte que la teneur en eau de 0,17-0,08 g/g de m.s (soit 14,5-7,4% base humide) et à partir d'une aw de 0,3 le produit se conserve à l'abri de l'air (conditionnement) et à température ambiante.

L'oxydation des acides gras insaturés est très élevée dans les produits ayant une aw < 0,1-0,2, par fixation de l'oxygène sur les radicaux libres. La stabilité maximale serait obtenue lorsque la monocouche des molécules d'eau (aw =0,2) s'oppose au passage de l'oxygène jusqu'au lipides ou entre en compétition avec les molécules d'oxygène pour occuper des sites d'absorption selon ALAIS et coll. (2004).

La couche monomoléculaire d'eau correspondrait à une activité de l'eau de 0,1 à 0,2. L'eau liée représente entre 3-10 g /100g de poids sec (3-10% b.s).

Les produits aux aw comme l'oignon (aw= 0,053) ayant une teneur en lipides à l'état séché entre 0,7 et 1,10 g/100 g (SOUCI et coll. 1994), doivent être conservés dans un emballage étanche à l'oxygène et opaque faisant barrière à la lumière et rayons solaires pour éviter les risques d'oxydation.

7-2-Evolution de la qualité du légume au cours du séchage

7-2-1-Rétrécissement et déformation

La variation de l'épaisseur des rondelles découpées, au début et à la fin séchage sont présentées dans le tableau 33.

Tableau 33 : Variation de l'épaisseur des rondelles d'Oignon découpées au début et fin séchage. (Rétrécissement axial de rondelles d'oignon séchées)

T°de séchage (°C)	tps (min)	Xi b.s/xi % b.h	Xf b.s	xf %b.h	épi de (mm)	épf (mm)	épf/épi %	Taux de rétraction épi-épf/épi%
60°C	360	8,62/89,6	0,075±0,01	6,98	6,35±0,52	2,33±0,25	36,7	63,3±2,3
	540	9,99/90,9	0,040±0,01	3,85	8,00±0,45	3,02±1,25	37,8	62,2±2,3
70°C	300	7,93/88,8	0,034±0,03	3,29	6,03±0,29	3,13±0,19	51,91	48,1±8,9
	390		0,073±0,05	6,80	8,20±0,24	3,03±0,005	37,0	63,0±1,2
85°C	270	7,55/88,3	0,051±0,05	4,85	5,87±0,33	3,69±1,23	62,9	37,1±18,1
	330	7,93/88,8	0,032±0,02	3,10	8,80±0,51	4,47±0,41	50,8	49,2±5,2

- Le taux de rétraction axiale de la petite épaisseur 6,35 mm est plus important à 60 °C, il est de 63,3 % par rapport à celui des deux autres températures de 70 et 85 °C qui sont de 48,1 % et 37,1 % qui sont plus faibles.

On constate que la rétraction de ces rondelles évolue suivant celle de la cinétique de séchage ; plus les rondelles perdent de l'eau et plus elles se rétractent, ceci est montré sur la courbe de la figure 78 et illustré par les photos de la figure 79.

La figure 78 montre le taux de rétrécissement de rondelles d'oignon de 6,35 mm d'épaisseur séchées à 60 °C, qui évolue en fonction de la teneur en eau dans le produit. Ce comportement est observé avec l'ensemble des rondelles des autres épaisseurs séchées aux trois températures.

- Pour l'épaisseur de 8,0 mm, le taux de rétraction le plus bas est noté à 85 °C, 49,2 %, il est plus élevé à 60 °C et 70 °C, respectivement de 62,2 % et 63,0 %.

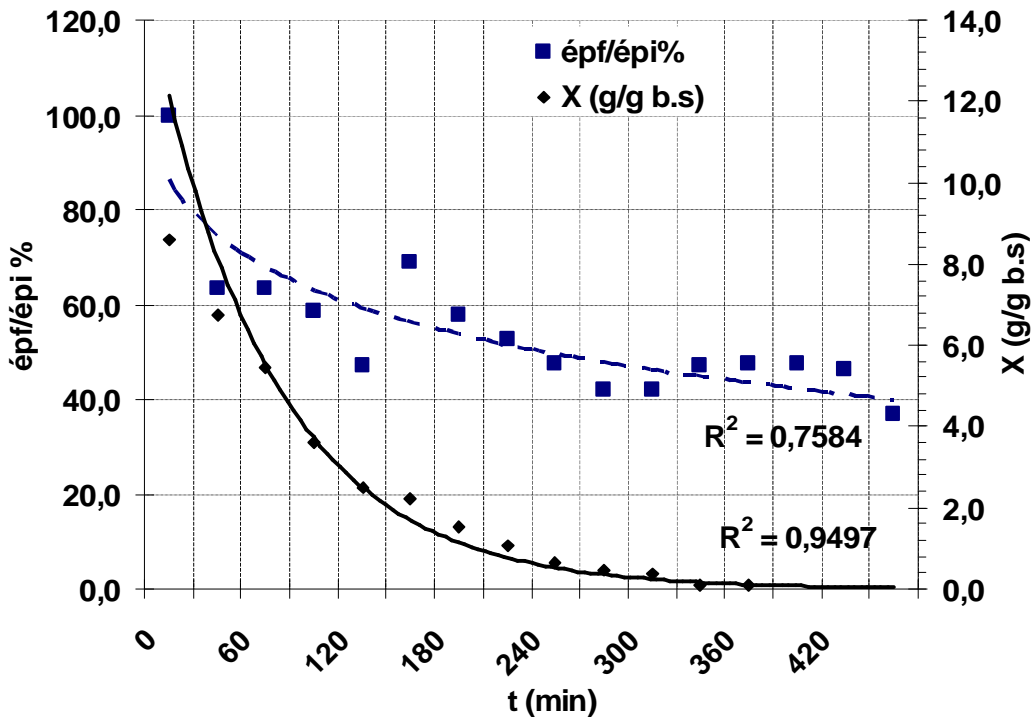


Figure 78 : Evolution du rétrécissement de rondelles d'oignon de 6,35 mm d'épaisseur séchées à 60 °C

Il est probable, avec la température 85 °C que le phénomène de durcissement provoqué par la chaleur sur les rondelles constitue le facteur limitant l'évaporation rapide et par conséquent sur le rétrécissement.

La rétraction se fait dans le sens axial, suivant l'allure de la cinétique de séchage. Enfin, les taux de rétraction les plus élevés sont représentés par la température de 60 °C avec les deux épaisseurs de découpe ainsi qu'à 70 °C avec l'épaisseur de 8,0 mm.

Les plus faibles taux de rétraction sont représentés par la température de 85 °C avec les deux épaisseurs de découpe ainsi qu'à 70 °C avec l'épaisseur 6,03 mm.

Ces derniers cas peuvent s'expliquer par le fait, que l'effet de la température de séchage sur le légume par la formation de croûte suite à l'assèchement de solutés avec un durcissement en surface des rondelles limite le départ de l'eau. La formation du brunissement non enzymatique et le croûtage de la surface exposée à l'air sec et chaud constituant un frein avec pour conséquence cette faible rétraction.

En fait, BIMBENET et coll. (2002 b) rapportent que l'évolution de la structure physique du matériau est directement liée au mode d'évaporation et de transport interne d'eau. Lorsque le transport d'eau a lieu sous forme liquide vers la surface, le produit a tendance à rétrécir proportionnellement au volume d'eau évaporée, dans la mesure où la résistance mécanique du matériau sec le permet. Cette résistance est remarquée chez les rondelles séchées à 85 °C.

L'effet de la température sur le taux de rétraction axiale est important sur les rondelles de petite épaisseur où il décroît proportionnellement à la température. Dans le cas de l'autre épaisseur, l'effet est moindre puisque le taux est le plus élevé à 70 °C, avec celui de 60 °C, et le plus bas est celui de 85°C. Ce qui est dû aux effets de la chaleur qui affecte la qualité du produit. Les deux autres températures n'affectent pas le produit et donnent des taux de rétraction plus importants.

L'effet de l'épaisseur de découpe sur le taux de rétraction montre, au vu du comportement des rondelles séchées à 60 °C, qu'il n'est pas significatif.

Celles séchées à 70 °C montrent un effet inversé où celui de l'épaisseur fine est plus faible que celui de l'autre.

Quant aux rondelles séchées à 85 °C, l'effet est similaire qu'à 70 °C, il est inversé.

Le comportement des rondelles d'oignon montre un effet significatif de la température sur le taux de rétraction axiale contrairement à celui de la taille de découpe.

7-2-2- Changement de la couleur

Au cours du séchage de l'oignon à 60 °C, les rondelles des deux épaisseurs ont présentées un début de rétrécissement à partir de 1h00 et à 2h les rondelles rétrécissent en surface. A partir de 2h30min elles durcissent et au bout de 3h elles s'aplatissent avec création du vide entre les feuilles constituant le bulbe jusqu'à la fin du séchage. Il n'est pas observé de changement de couleur sur les rondelles de 6,0 mm à cette température.

Le séchage de l'oignon à 70 °C, montre un début de rétrécissement à partir de 1h00 à 3h00. Entre 3 et 4h une déformation est observée qui se manifeste par un aplatissement et dessèchement en surface. Ensuite, les rondelles d'oignon deviennent rigide entre 6 et 6h 30min avec apparition du vide entre les feuilles du bulbe sans brunissement apparent.

Le séchage à 85°C des rondelles de 8,3 mm montre un début de rétrécissement après 1h00 de séchage. A 2h 30min les rondelles ont rétrécis. Au bout de 3h l'aplatissement apparaît avec un vide entre les feuilles du bulbe qui s'installent. A 4h 30 de séchage il y'a apparition du léger brunissement qui s'accroît au fur et à mesure du séchage qui devient apparent à 4h45min jusqu'à la fin du séchage. Le même comportement est observé sur les rondelles de 6,0 mm que celles-ci montrent une sensibilité au séchage par un brunissement plus intense que celles de 8,03mm d'épaisseur.

Lors du séchage, quand le produit perd de l'eau, la matrice du produit rétrécit pour occuper le volume d'eau perdue.

À basse teneur en eau la structure cellulaire perd par rigidification, sa capacité de rétraction; ce phénomène dépend des conditions de séchage; cas du séchage rapide (DO AMARAL SOBRAL et coll., 2001).

Dans le cas de nos échantillons, il est remarqué que les rondelles séchées à 60 °C rétrécissent plus que celles séchées à 70 °C. Les rondelles séchées à 85 °C, ont présenté une durée de séchage plus courte avec un taux de rétraction plus bas du au durcissement et brunissement de leur surface limitant la diminution de leur taille.



Figure 79 : Prises de vues de l'évolution du changement de forme et de couleur des rondelles d'oignon de 6,0 et 8,03 mm d'épaisseur , séchées à 60 , 70 et 85 °C.

7-3-Réhydratation de l'oignon séché

L'évolution de l'absorption d'eau des rondelles d'oignon transformée en teneurs en eau absorbées et exprimées en taux de réhydratation par rapport à la teneur en eau initiale.

L'évolution de l'absorption d'eau par les rondelles est illustrée par les photos de la figure 80.

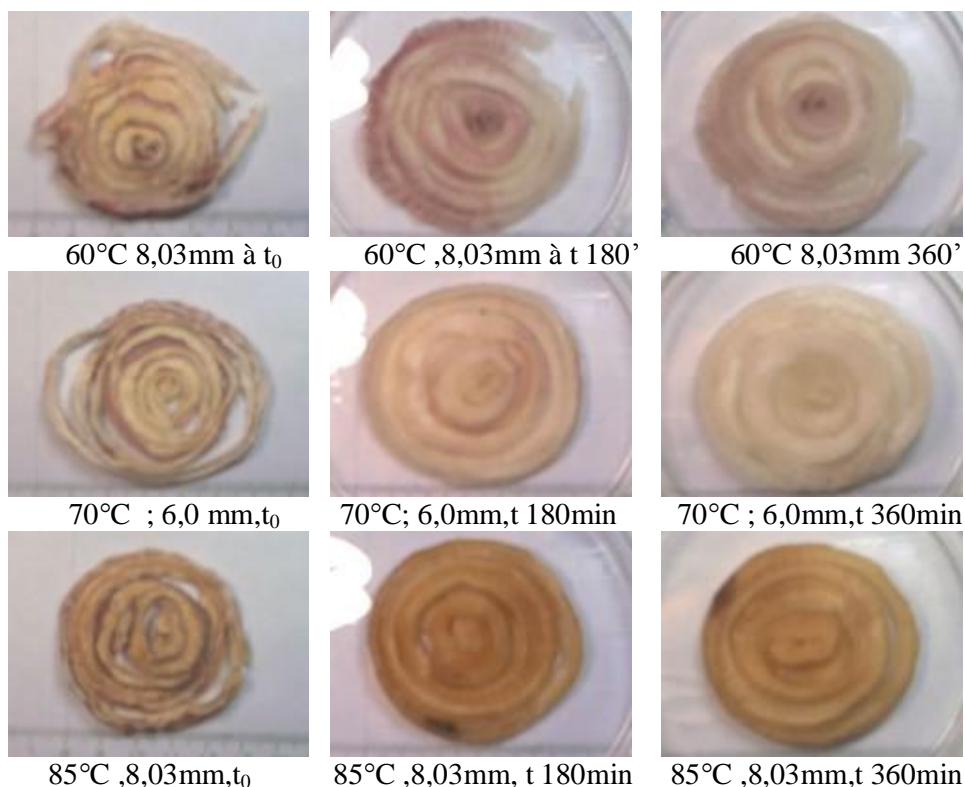


Figure 80 : Prises de vue de l'évolution de la réhydratation de rondelles d'oignon de 6,0 et 8,03 mm d'épaisseur, séchées à 60, 70 et 85 °C.

7-3-1- Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation de l'oignon

Les taux de réhydratation sont calculés à partir des teneurs en eau qui évoluent dans le temps, et permettent de tracer les courbes d'évolution de la réhydratation du légume (figures 81 et 82).

L'évolution de la réhydratation du légume avec les teneurs en eau et épaisseur finale des rondelles après séchage et après réhydratation (X_{fsec} , $X_{réh}$, $épf\ séc$, $épf\ réh$), ainsi que leur taux de réhydratation final, sont résumés dans le tableau 34 suivant.

Tableau 34 : Taux de Réhydratation de l'oignon (à 26±2°C) en fonction de la température de séchage et de la taille de découpe.

T° de séchage	épi de découpe (mm)	t de séchage (min)	mmoy. rondelles sèches (g)	ép f sec (mm)	Xi b.s/xi % b.h	Xf séché (g/g)	Xréh (g/g)	TR= Xréh/Xi*100 (%)
60°C	6,0±0,1	360	0,29±0,01	2,33±0,25	8,62/89,6	0,094	6,27	72,8±0,4
	8,3±0,3	390	0,34±0,07	3,02±1,25	9,99/90,9	0,042	4,17	41,7±2,3
70°C	6,0±0,1	270	0,36±0,03	3,13±0,19	8,62/89,6	0,046	5,11	59,4±4,4
	8,3±0,3	390	0,87±0,06	3,03±0,005		0,069	4,16	48,2±1,2
85°C	6,0±0,1	270	0,35±0,03	3,69±1,23	7,55/88,3	0,02	4,95	65,6±1,3
	8,3±0,3	330	0,65±0,04	4,47±0,41	7,93/88,8	0,053	3,84	48,4±0,5

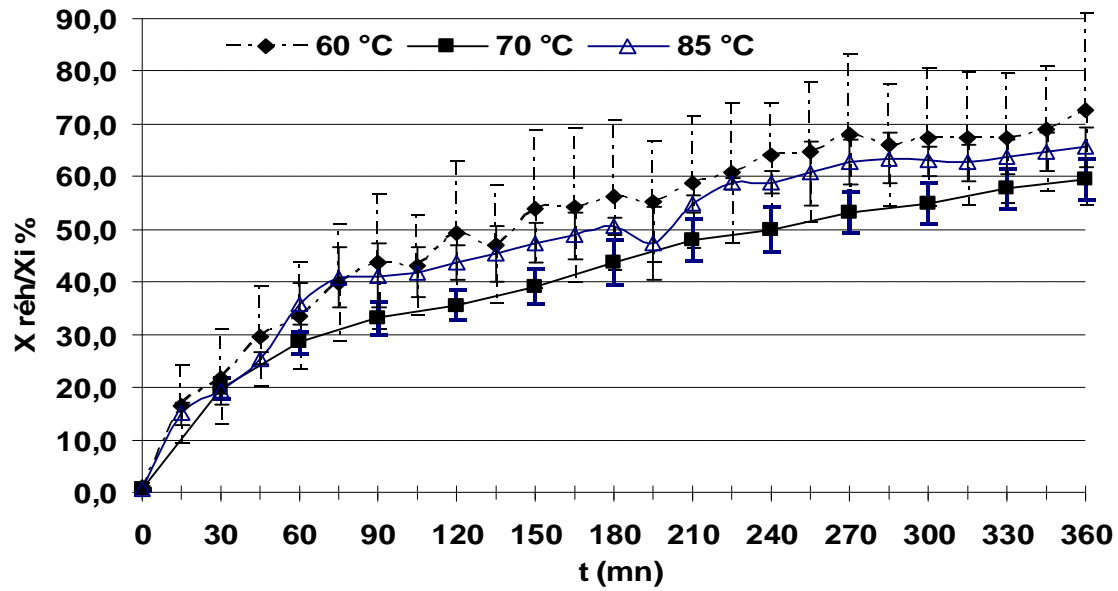
En séchage classique par air chaud, selon JAYARAMAN et DAS GUPTA (1995) cités par BIMBENET et coll. (2002b) les séchages les plus rapide conduisent aux meilleures réhydratations et dans tous les cas, le taux de réhydratation est en bonne partie lié à la dénaturation des protéines, elle même fonction des couples temps-températures atteints pendant le séchage.

Dans le cas de nos échantillons de l'épaisseur 6,0 mm (figure. 81 a), la meilleure capacité de réhydratation (près de 73 %) est assurée par la température de séchage la plus faible, 60 °C avec 72,8 %, une durée de séchage de 360 min (6h00min) et une teneur en eau finale Xf = 0,094 g/g b.s (8,59 % b.h). Ensuite vient celle de 85 et 70 °C avec un taux de réhydratation respectif 65,6 et 59,4 %, d'une durée de séchage égale de 270 min (4 h30min) et une teneur en eau finale de 0,02 et 0,046 g/g b.s (1,96 et 4,4 % b.h) .

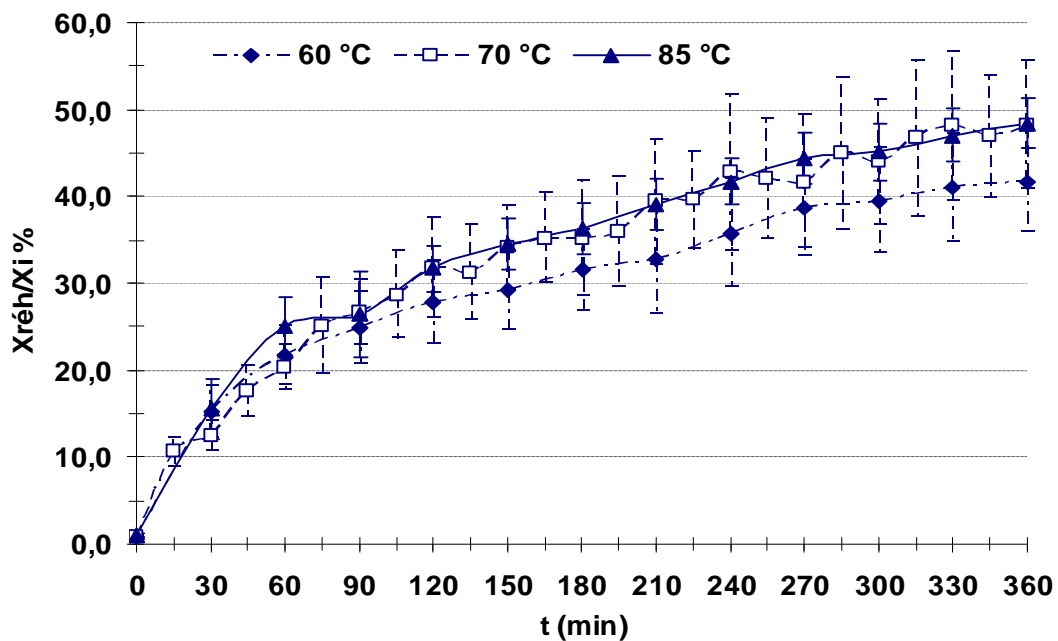
Les taux de réhydratations de l'épaisseur 8,3 mm (figure 81 b) sont moins intéressants .La température de 60°C assure le taux de réhydratation de 41,7 % avec une durée de séchage de 390 min (6h30min) .Les température de 85 et 70 °C assurent des taux de réhydratation presque égaux de 48,4 et 48,2 % avec une durée de séchage différente 330 min (5h30min) et 390 min (6h30min) respectivement.

Ceci nous amène à dire que l'effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation est plus important du point de vue altération de la structure du produit. La dénaturation des protéines est probablement moindre dans l'oignon, dont la teneur est de 1,3 à 1,4 g/100g de produit (FAVIER et coll. 1995 ; SOUCI et coll. 1994).

Lorsque le produit reste moins de temps exposé à l'effet de la chaleur les risques d'altérations sont moindres.



a : Effet de la température sur la capacité de réhydratation de rondelles d'oignon de 6,0 mm d'épaisseur



b : Effet de la température sur la capacité de réhydratation de rondelles d'oignon de 8,3 mm d'épaisseur

Figure 81 : Effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation de rondelles d'oignon de 6,0 mm (a) et 8,3 mm (b), réhydratées à l'eau distillée à température ambiante

COLAS (2003), rapporte que diverses modifications subies par les protéines de la membrane et par les substances pectiques de la paroi de la lamelle moyenne. A l'opposé, en raison des structures très ordonnées de la cellulose et la lignine, les tissus à paroi secondaire et les tissus lignifiés subissent peu de ramollissement, ceci est probablement valable pour l'oignon dont la teneur en fibres et glucides qui sont de 1,8 et 7,0 g/100g d'oignon cru (FAVIER et coll. 1995 ; SOUCI et coll. 1994).dont les modifications ont été importantes lors du séchage des rondelles à température élevée qui n'ont pas donné des taux de réhydratation conséquents.

7-3-2- Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de l'oignon

Les figures 82 a à c , montrent l'effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation. Elles montrent que la dimension de découpe du légume séché a une influence significative sur l'allure de la réhydratation.

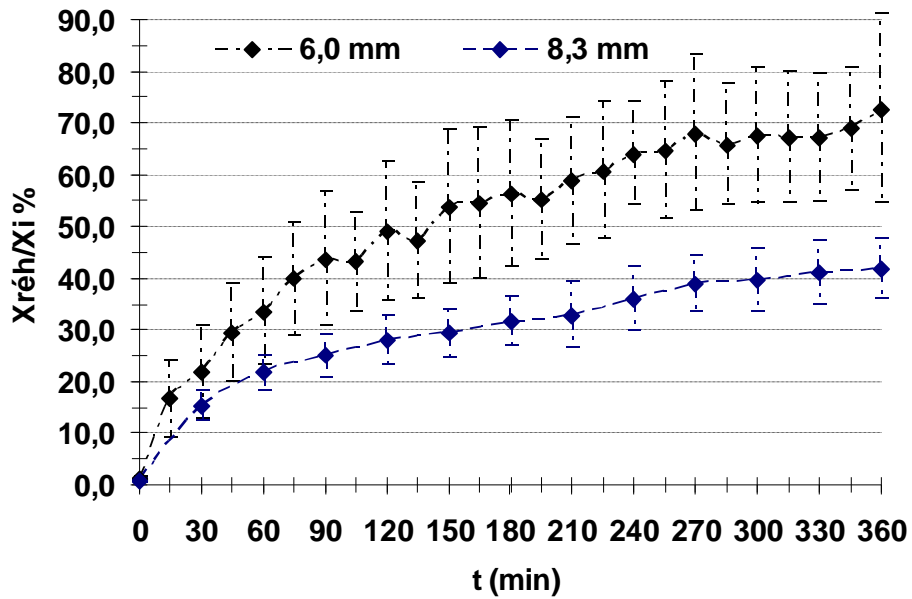
Les courbes sont bien distinctes d'une épaisseur à une autre et ont données des taux de réhydratations différents.

-Les rondelles de la petite épaisseur (6,0 mm) sont celles qui ont données les taux de réhydratation les plus élevés à 60 °C (figure 82 a) de 72,8 % et celui de 8,3 mm est de 41,7 % dont la durée de séjour est de 6h et 6h30min respectivement.

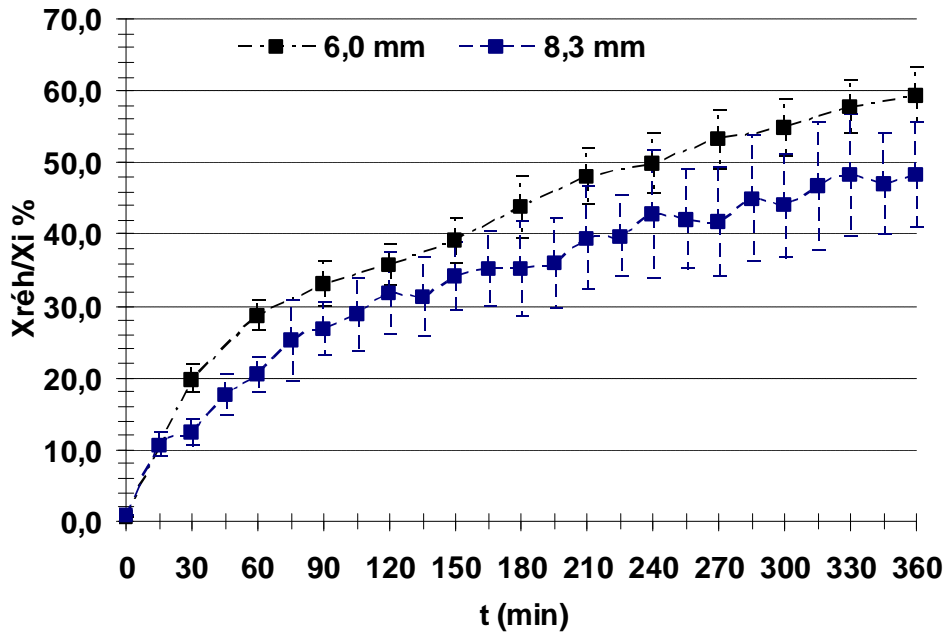
-Dans la figure 82 b ,il apparaît que l'épaisseur de 6,0 mm assure le taux le plus élevé à 70 °C de 59,4 par rapport à celui de l'épaisseur 8,3 mm qui est de 48,2 %;leur durée de séjour respective est de 4h30min et de 6h30min.

-Enfin, la figure 82c montre une différence des taux de réhydratation entre les deux épaisseurs séchées à 85 °C où la plus petite assure 65,6 % et la plus épaisse 48,4 % de réabsorption d'eau. La durée de séjour est de 4h30min et 5h respectivement (tableau n°34).

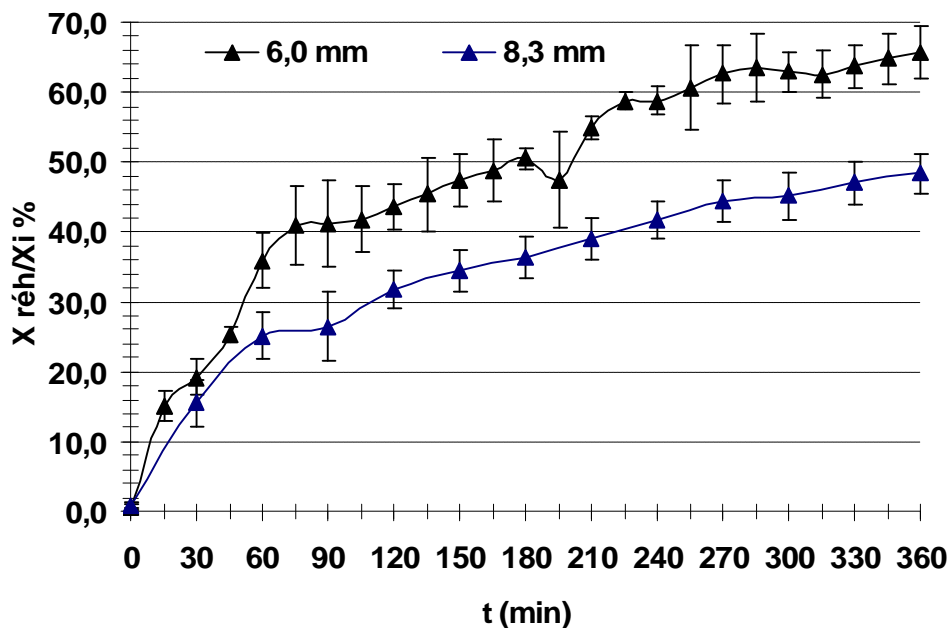
L'effet de l'épaisseur est très significatif dans la mesure où la petite épaisseur 6,0 mm assure les taux de réhydratation les plus élevés par rapport à celle de 8,3 mm. Les courbes de réhydratation évoluent distinctement l'une de l'autre pour les températures de séchage des trois températures malgré des écarts type assez importants (cas de l'épaisseur 6,0 mm à 60 °C et 8,3 mm à 70 °C).



a : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de rondelles d'oignon séchées à 60°C



b : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de rondelles d'oignon séchées à 70 °C



c : Effet de la taille découpe sur la capacité de réhydratation de rondelles d'oignon séchées à 85 °C

Figure 82 : Effet de la taille de découpe sur la capacité de réhydratation de rondelles d'oignon séchées à (a) 60; (b) 70 et (c) 85 °C, et réhydratées à l'eau distillée à température ambiante

Sur le plan de la qualité, les caractéristiques de l'oignon sont satisfaisantes. L'aspect des rondelles montre une reprise de la forme et la couleur chez celles séchées à 60 et 70 °C (figure 80 a et b). Elle est insatisfaisante chez celles séchées à 85 °C dont la couleur du bruissement n'a pas disparu même avec reprise de la forme (figure 80c).

Conclusion:

Les résultats que nous avons obtenu sont confortés par ce qui est rapporté par KROKIDA, MAROULIS, TSAMI & MARINO-KOURIS (1997) cités par KROKIDA et *al.*, (2003) à propos de l'utilisation fréquente du séchage par air conventionnel dans les opérations de déshydratation dans les industries alimentaires et de l'influence importante sur la cinétique de séchage par la température de l'air et les caractéristiques de dimensions du produit.

Le séchage de l'oignon montre que l'effet de l'épaisseur ainsi que celui de la température de séchage, sur l'altération du produit et le temps de séjour de ce dernier, sont des facteurs

déterminants sur la cinétique, la vitesse de séchage et également sur le taux de rétraction et l'aptitude du produit à se réhydrater.

La petite épaisseur assure des vitesses de séchage plus élevées à 70 et 85 °C que celles de l'autre épaisseur. L'effet de la température est important sur les cinétiques et vitesses de séchage de l'épaisseur 6,0 mm.

L'effet de la température est important sur la durée de séchage respective qui est plus courte à 85 °C que pour les deux autres.

L'effet de la température est plus important sur le taux de rétraction de l'épaisseur la plus mince, celui de l'épaisseur est plus significatif lors du séchage à la température de 70 °C sur les deux épaisseurs.

les effets observés sur les rondelles épaisses par leur brunissement et l'altération éventuelle du tissu (à 85 °C) qui conduit à un faible taux de réhydratation et les résultats intéressants obtenus avec l'épaisseur la plus mince séchée à 60 °C.

Cependant à 85 °C l'épaisseur fine a moins rétréci par rapport aux autres épaisseurs et a assuré un taux de réhydratation intéressant.

Ces résultats sont confortés par WANG et XI (2004) qui ont rapporté que l'échantillon plus épais utilise plus d'énergie que celui qui est mince, ceci reflète la faible capacité de réhydratation et un temps plus lent pour sécher les échantillons plus épais. De même pour la rétraction (diminution de l'épaisseur) qui conduit à une augmentation de l'énergie nécessaire pour le transfert de l'eau.

D'après les résultats obtenus des cinétiques de séchage de l'oignon et l'étude de son comportement au cours et après séchage, nous pouvons conclure qu'il existe une interrelation entre la température de l'air et l'épaisseur du produit et leur effets cumulés sur la durée et la vitesse de séchage, le taux de rétraction et leurs conséquences sur la qualité (forme et couleur) et capacité de réhydratation des légumes séchés.

7-4-Séchage solaire

7-4-1- Performances du séchoir

Les performances du séchoir sont présentées au niveau du § 5-4-1 (tableaux 26 a et 26b).

Les variations de température moyennes au cours du séchage de l'oignon au niveau du collecteur sont rappelées ; $60,5 \pm 3,1$ °C pour l'épaisseur 5 mm et $54,5 \pm 5,1$ °C pour 8 mm.

7-4-2- Cinétique de séchage

L'évolution de la cinétique de séchage des rondelles d'oignon coupées en 5,0 et 8,0 mm d'épaisseur est présentée dans la figure 83.

Les courbes expérimentales sont lissées manuellement en Δt de 30 min (figure 83 a) pour permettre la transformation de l'évolution de la teneur en eau en vitesse de séchage en fonction du temps moyen (figure 83 b) et en fonction de la teneur en eau moyenne (figure 83c).

Les échantillons d'oignon de 5,0 mm d'épaisseur ont été séchés en deux jours (11h) et celles de 8,0 mm en quatre jours (25h) (figure 70 a) avec une durée de séchage de cinq et six heures par jour.

La teneur en eau initiale de l'oignon est X_i 7,928 g/g b.s soit 88,8 % sur base humide.

En fin de chaque journée de séchage les échantillons sont placés dans un dessiccateur durant la nuit (19 heures) où nous avons noté une variation de masse et donc perte d'humidité.

Cette perte est en moyenne ΔX 1,442 g/g b.s soit 59,05 % sur base humide (1^{ère} nuit entre la 5^{ème} et la 6^{ème} heure de séchage) pour l'épaisseur 5,0 mm.

Elle est de ΔX 0,621 g/g b.s soit 38,31 % b.h (1^{ère} nuit entre la 5^{ème} et la 6^{ème} heure) et 0,27 g/g b.s soit 21,26 % b.h (2^{ème} nuit entre la 12^{ème} et 13^{ème} heure), et enfin 0,013 g/g b.s soit 1,28 % b.h (3^{ème} nuit entre la 19^{ème} et 20^{ème} heure de séchage) soit en totalité 0,904 g/g b.s (47,48% sur base humide) pour l'épaisseur 8,0 mm.

Les vitesses de séchage initiales au tmi 15 min sont de 1,396 et 1,039 g/g m.s/h respectivement pour les deux épaisseurs 5,0 et 8,0 mm.

Les rondelles de 5,0 mm d'épaisseur sont séchées pendant un Δt de 11 heures (deux jours) avec ΔX totale de 7,904 g/g b.s soit 88,77 % b.h.

La variation de la teneur en eau en 5 heures de séchage du 1^{er} jour est de 5,874 g/g b.s (85,45 % b.h). la deuxième journée de séchage avec Δt 6 h , ΔX est 1,276 g/g b.s (56,06 % b.h) jusqu'à la teneur en eau finale X_f de 0,024 g/g b.s soit 2,34 % sur base humide.

Les rondelles de 8,0 mm sont séchées pendant un Δt de 25 heures (cinq jours) avec ΔX total de 7,866 g/g b.s soit 88,72 % b.h.

La variation de la teneur en eau sont : Δt_1 5 heure de la première journée de séchage ΔX_1 est de 3,638 b.s (78,44 % b.h) ; Δt_2 6h (entre 6 à 12 h) de séchage ΔX_2 est de 2,597 g/g b.s (72,20 % b.h) ; Δt_3 5h (entre 13 et 19 h) ΔX_3 est de 0,737 b.s (42,43 % b.h) , et enfin Δt_4 des cinq dernières heures de séchage (entre 20 et 25h) ΔX_4 est de 0,022 g/g b.s (2,15 % b.h) à la teneur en eau X_f de 0,062 g/g b.s soit 5,84% sur base humide.

La durée effective de séchage s'avère de 10 heures pour 5,0mm et de 21 heures pour 8,0 mm.

L'allure générale des courbes de cinétique et de vitesse de séchage montre que le séchage se déroule en phase de vitesse décroissante en l'absence des deux phases; constante et de mise en température. Cette phase décroissante montre qu'il est possible de subdiviser en sous phases.

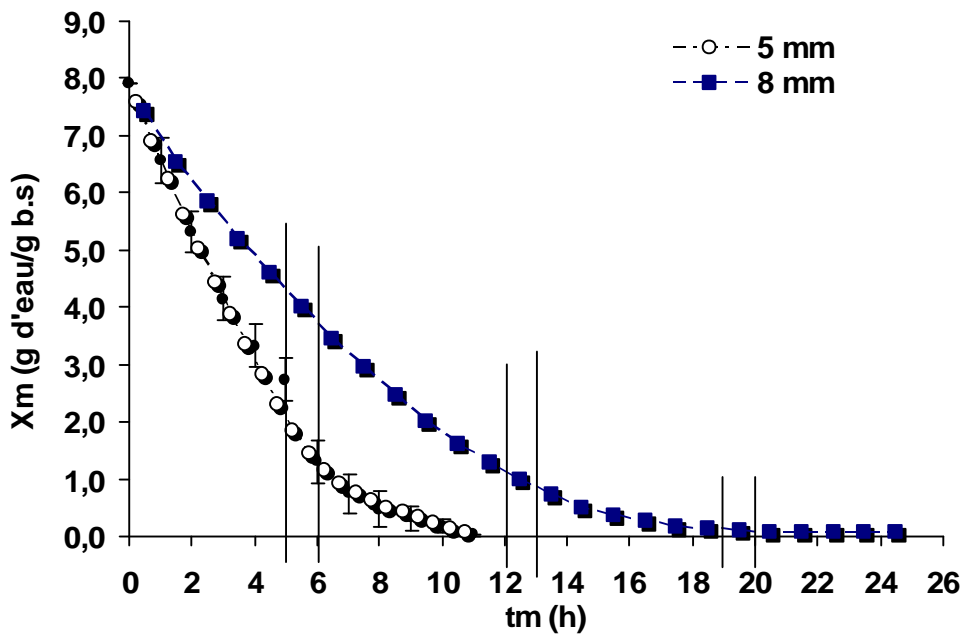
Les figures 83 b et 83 c montrent des points d'inflexions où le changement de pente est illustré par une variation de l'évolution de la vitesse de séchage en deux sous phases.

Une première sous phase pour l'épaisseur de 5,0 mm, à décroissance rapide jusqu'à X_m de 1,827 g/g b.s (64,63 % b.h) correspondant à Δt_1 de 5h 15 min (315 min) et ΔX_m 6,101 g/g b.s soit 85,92 % b.h.

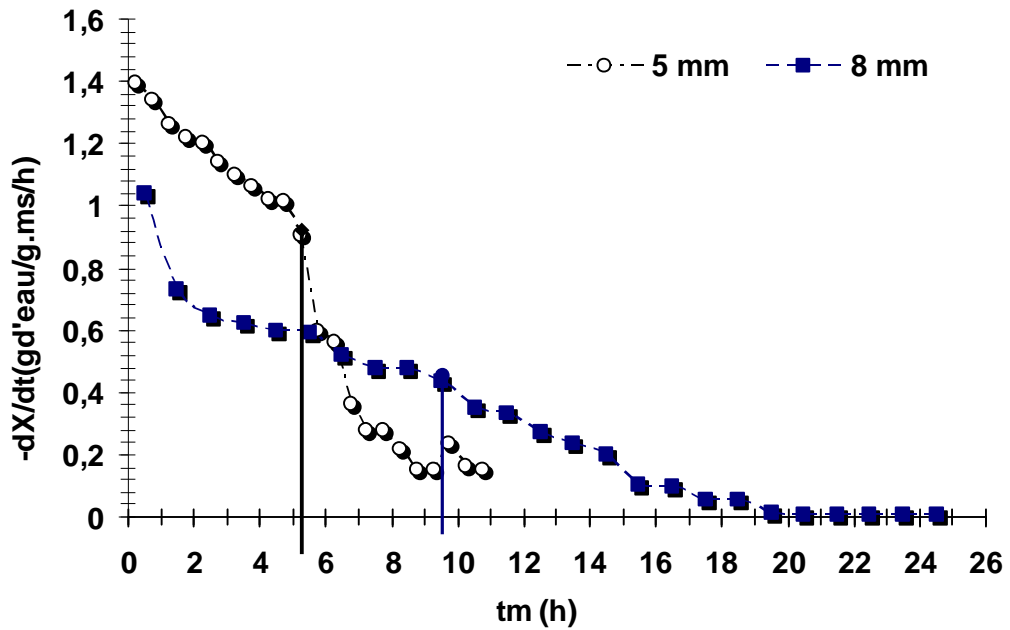
La deuxième sous phase de décroissance ralentie jusqu'à la teneur en eau finale X_f 0,024 b.s (2,34 % sur base humide) correspond à ΔX_m 1,803 g/g b.s soit 64,32 % sur base humide. Le Δt_2 de 5 h 45 min (345 min) correspond 52,27 % de la durée totale du séchage.

Une première sous phase pour l'épaisseur de 8,0 mm , à décroissance rapide jusqu'à X_m de 2,008 g/g b.s (66,75 % b.h) correspondant à Δt_1 de 9h 30 min (570 min) et ΔX_m 5,921 g/g b.s soit 85,55 % b.h.

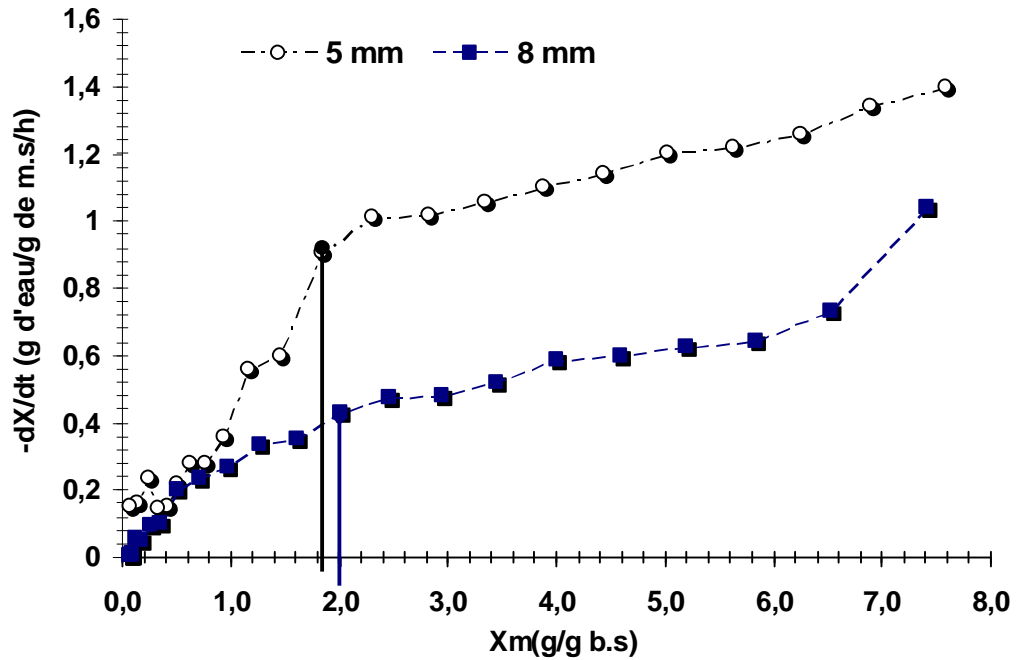
La deuxième sous phase de décroissance ralentie jusqu'à la teneur en eau finale X_f 0,062 b.s (5,84 % sur base humide) correspond à ΔX_m 1,946 g/g b.s soit 66,06 % sur base humide. Le Δt_2 de 15 h 30 min (930 min) correspond 62,0 % de la durée totale du séchage.



a : Cinétique de séchage solaire de rondelles d'oignon ; $X_m = f(t_m)$



b : vitesse de séchage solaire de rondelles d'oignon ; $-dX/dt = f(t_m)$



c : Vitesse de séchage solaire de rondelles d'oignon ; $-dX/dt = f(X_m)$

Figure 83 : Effet de la taille de découpe sur la cinétique et vitesse de séchage des rondelles d'oignon de 5,0 et 8,0 mm d'épaisseur ; (a) $X_m = f(t_m)$; (b) $-dX/dt = f(t_m)$ et (c) $-dX/dt = f(X_m)$

7-4-3- Discussion et conclusion

Les deux rondelles démarrent à des vitesses de séchage initiales différentes dont la plus élevée est assurée par la petite épaisseur avec des teneurs en eau X_{mi} à 15 et 30 min où celle de 5,0 mm est plus faible que celle de 8,0 mm.

La teneur en eau finale atteinte par la tranche de 5,0 mm est plus faible que celle de 8,0 mm. La durée de séchage plus courte pour la petite épaisseur (11h) que la plus épaisse (25 h).

Les points d'inflexions montrent une première sous phase relative à l'évaporation de l'eau des capillaires (faiblement liée) avec une quantité éliminée plus élevée avec 5,0 mm en un temps plus court que celle de 8,0 mm dont la durée est de presque 2,0 fois plus élevée (1,81 fois).

La deuxième sous phase est plus longue avec diminution de la vitesse de séchage. La quantité d'eau évaporée est plus importante chez l'épaisseur 8,0 mm que celle de la moins épaisse en une durée plus longue. Elle correspond à l'élimination de l'eau de plus en plus liée qui est difficile à extraire. La durée de 8,0 mm est 2,7 fois celle de 5,0 mm dans cette sous phase.

Il est plus intéressant de sécher dans ce séchoir solaire des rondelles de 5,0mm d'épaisseur qu'une autre plus épaisse. L'effet de l'épaisseur est très significatif sur la cinétique et vitesse de séchage.

C / Discussion des résultats et Synthèse

Notre travail sur l'étude du séchage de denrées alimentaires d'origine végétale a consisté à suivre l'évolution du séchage par convection d'air chaud de six légumes largement consommés ; carotte, courgette, cardon, pomme de terre, ail et oignon.

Nous avons établi des courbes cinétiques de vitesse de séchage des légumes en fonction de deux paramètres : température et épaisseur de découpe.

Les variations des mécanismes de transferts de masse ont pu être représentés par l'approche des flux d'élimination de l'eau avec l'évolution de la vitesse de séchage au cours du temps et en fonction du contenu en eau résiduelle.

L'effet de deux paramètres sur la qualité du produit est mis en évidence en suivant le comportement des six légumes au cours et après séchage. Le suivi du taux de rétraction des morceaux de légumes, le changement de forme, et de couleur et leur capacité à se réhydrater (réabsorption d'eau) avec détermination (approximative) de l'activité de l'eau des produits séchés ont été réalisés.

Le séchage par air conventionnel étant le plus fréquemment utilisé dans les opérations de déshydratation dans les industries alimentaires. L'importante influence sur la cinétique de séchage par la température de l'air et les caractéristiques de dimension du produit rapporté par la littérature conforte les résultats auxquels nous sommes parvenus avec les cinétiques et vitesses de séchage.

Le séchage de la carotte, de la courgette, du cardon, de la pomme de terre, de l'ail et de l'oignon montre que l'effet de l'épaisseur ainsi que celui de la température de séchage, sur l'altération du produit et le temps de séjour sont des facteurs déterminants sur la cinétique, la vitesse de séchage, et également sur le taux de rétraction et l'aptitude du produit à se réhydrater.

La température et les dimensions du produit mis à sécher influent sur le processus de séchage. La durée de séchage des rondelles et tranches les moins épaisses aux trois températures est assez courte et celles séchées à 85 °C assurent le temps le plus court des trois températures . Plus on augmente la température de séchage et plus la durée est moins longue.

L'évolution du séchage s'effectue en phase à allure de séchage décroissante, que nous avons divisée en deux sous phases selon la température et l'épaisseur des tranches et des rondelles.

L'ensemble des légumes sèchent à deux vitesses (ou sous phases) de décroissance, avec une première sous phase rapide relative au départ de l'eau faiblement liée et une deuxième sous phase ralentie, correspondant à l'eau de plus en plus liée qui est difficile à éliminer et consomme beaucoup d'énergie. La durée de cette période est plus longue, elle représente entre 68 % (courgette, cardon) et 92 % (ail) de la totalité du temps de séchage jusqu'à la teneur en eau résiduelle finale.

L'effet de la température est plus important sur le taux de rétraction de l'épaisseur la plus mince à 60 °C, celui de l'épaisseur est plus significatif lors du séchage des trois épaisseurs à la même température.

L'évolution de la diminution de la taille suit celle de la cinétique de séchage. L'effet de la température sur le taux de rétraction est important sur les morceaux de petite épaisseur où il croît proportionnellement à la température. Le même effet est noté sur le taux de rétraction du diamètre.

L'effet de la température n'est pas apparent sur la rétraction des morceaux plus épais.

L'effet de l'épaisseur de découpe sur le taux de rétraction, au vu du comportement du séchage à 60 °C, est important, il augmente proportionnellement à la taille de découpe ; la plus petite assure un taux de rétraction moins important que celui de l'épaisseur moyenne qui lui-même est inférieur à celui de la plus épaisse des découpes.

En plus des effets du départ de l'eau à partir de la matrice du végétal par la création d'une certaine porosité et le vide laissé par le transfert de l'eau sous forme liquide en début de séchage et où le rétrécissement est proportionnel au volume d'eau évaporé, les rétractions s'accompagnent en général, pour les produits biologiques, d'un écrasement de cellules qui crée un durcissement de la surface du légume.

L'effet de la température est inversé sur les morceaux plus épais, où le taux de rétraction est variable par rapport aux deux autres températures, selon les caractéristiques de forme et du tissu de chaque légume. Ce qui est dû aux effets de la chaleur qui affecte la qualité du produit. L'effet sur le taux de rétraction du diamètre est inversement proportionnel à la température, il diminue quand la température augmente.

Ce phénomène étant renforcé par la concentration des sucres et autres solutés entraînés par la diffusion de l'eau liquide. L'apparition d'une sorte d'affaissement des morceaux de découpe qui s'aplatissent, se déforment par une torsion et se recroquevillent sur eux mêmes, probablement du à ce phénomène d'écrasement des cellules.

Les produits séchés sont caractérisés par une faible porosité. Un changement de couleur significatif arrive durant le séchage par air conventionnel.

A cela s'ajoute de très fortes concentrations de solutés à la surface, observées avec pour effet probable d'obstruer les pores du produit permettant la sortie de l'eau.

En plus des effets mécaniques lors du séchage sur les propriétés de structure, le brunissement et le croûtage du aux solutés qui accompagnent l'eau au cours de la première sous période de séchage avec éventuelle obstruction des pores, dont les conséquences sont un durcissement qui a été observé et remarqué sur l'ensemble des tranches et rondelles les plus épaisses de la majorité des légumes étudiés.

Nous avons constaté que la différence de la durée de séchage entre les rondelles et tranches de différentes tailles de découpe étudiées, montre des changements de couleur ,avec des déformations, différentes et de plus en plus intenses de façon proportionnelle à l'épaisseur.

La couleur ne change pas pour l'ensemble des morceaux séchés aux différentes températures chez le cardon. Le brunissement n'apparaît que sur les tranches de 32,0 mm après une longue durée d'exposition à l'air de 85 °C, mais il reste léger.

Tous ces aspects ralentissent et constituent des facteurs limitants la réhydratation

Il est observé un passage des substances dissoutes dans l'eau de réhydratation qui s'est colorée en jaune orange, vraisemblablement due à la dissolution et diffusion des pigments caroténoïdes de la carotte (provitamine A).

Les résultats obtenus sont assez satisfaisants avec des taux de réhydratation pour la petite épaisseur qui sont supérieurs à 80 % avec les rondelles séchées à 60 et 70 °C de la carotte.

Dans le cas de la réhydratation de la carotte, le cardon et l'ail nous observons les mêmes phénomènes rapportés par la littérature. En divisant les courbes d'évolution en deux sous phases, nous pouvons constater qu'en début de réhydratation la vitesse d'absorption d'eau est rapide et en progression continue.

Le changement de l'allure de la pente est observé à partir de 180 min (3h) (carotte), de 60 min (1h) (cardon) et de 105 min (1h 45 min) (ail) où, la vitesse de réhydratation ralentie et on a atteint le plateau de saturation.

Nous avons alors assimilé ce comportement à une absorption capillaire en début et la deuxième sous phase à une diffusion progressive lente aboutissant au gonflement du produit avec une quasi-récupération de la forme et la taille initiales du légume.

La récupération de la forme et de l'épaisseur des rondelles est probablement due à la participation active du phloème et du xylème. Ce dernier, riche en fibres, représente $41,4 \pm 4$ % (rapport du diamètre du xylème/diamètre du phloème) permettant ainsi le gonflement du tissu de la carotte.

L'effet de la température n'est pas assez significatif sur le taux de réhydratation de chacune des rondelles séchées aux trois températures.

La dimension du légume séché a une influence significative sur l'allure de la réhydratation.

L'eau de réhydratation est restée sans changement, le cardon n'ayant pas subi de brunissement au cours du séchage et visiblement il n'y a pas eu de diffusion de substances dissoutes colorant l'eau.

La récupération de la forme et de l'épaisseur des tranches est probablement due à la richesse du produit en fibres et amidon qui participent activement au gonflement du tissu du cardon.

L'ensemble des tranches de cardon séchées assure un taux de réhydratation compris entre 53 et 112%. Ceci montre que le légume possède une capacité de réhydratation assez importante avec reprise de la taille initiale avant séchage. Dans le cas des tranches de 5,8 et 8,8 mm, la mesure de l'épaisseur après réhydratation s'est révélée être supérieure à l'épaisseur de découpe.

La déformation et la torsion des tranches ont disparues avec une reprise de la forme initiale.

L'effet de la température de séchage sur la capacité de réhydratation est apparent. L'évolution de l'absorption d'eau des tranches se fait de manières distinctes où chaque température révèle une allure différente de l'autre, avec reprise de la couleur originelle du produit d'un vert foncé.

Parallèlement à la reprise d'eau, il est observé un gonflement du produit (WITROWA-RAJCHET et LEWICKI, 1998), et une évolution de la texture (ABU GHANNAM, 1998) cités par (BIMBENET et coll., 2003). ces affirmations confortent nos résultats.

L'effet de la température sur les composants essentiels de l'ail ; à savoir l'amidon, protéines et fibres qui auraient subi une altération freinant ainsi la capacité d'absorption de l'eau chez l'épaisseur 7,8 mm à 70 °C.

Cependant la richesse de l'ail en ces éléments aurait probablement contribué à atteindre des taux de réhydratation assez conséquents supérieur à 85 % et dépassant les 100 % pour les autres tranches.

La meilleure capacité de réhydratation est assurée par la température de séchage de 60 et 70 °C et l'épaisseur la plus faible, qui ont dépassée les 100% (107,7 et 103,7 %) et n'ont subi aucune altération ni changement de couleur.

Sur le plan de la qualité, les caractéristiques de l'oignon sont satisfaisantes. L'aspect des rondelles montre une reprise de la forme et la couleur. Elle est insatisfaisante chez celles séchées à 85 °C dont la couleur du bruissement n'a pas disparue même avec reprise de la forme. Le brunissement et l'altération éventuelle du tissu (à 85 °C) qui conduit à un faible taux de réhydratation.

Les résultats les plus intéressants sont obtenus avec l'épaisseur la plus mince à 60 °C.

Les rondelles de courgettes apparemment absorbent moins l'eau que les précédents légumes, avec diminution de l'intensité du rétrécissement, mais la déformation est restée comme pour la carotte dans certains cas, et dans d'autres la reprise de forme est quasi –totale avec reprise de l'épaisseur initiale d'avant séchage.

Le taux de réhydratation est fortement lié à la dénaturation des protéines, qui est fonction des couples temps -températures atteints pendant le séchage.

Cependant, le taux de réhydratation pour l'ensemble des rondelles séchées aux trois températures, est assez bas du fait que la teneur en eau atteinte après réhydratation n'arrive pas à récupérer les 50% de l'eau perdue lors du séchage.

L'effet de la température sur le composant essentiel de la pomme de terre ; à savoir l'amidon aurait subi une transformation freinant ainsi la capacité d'absorption de l'eau. La gélatinisation est l'un des phénomènes qui limitent la prise d'eau. L'amidon étant connu pour son pouvoir absorbant élevé, n'apparaît pas dans le cas de nos rondelles qui d'ailleurs les plus faibles taux de réhydratation sont obtenus avec la pomme de terre en comparaison avec les autres produits que nous avons séché.

D'après les résultats obtenus des cinétiques de séchage des légumes et l'étude de leur comportement au cours et après séchage, nous pouvons conclure qu'il existe une interrelation entre la température de l'air et l'épaisseur du produit et leur effets cumulés sur la durée et la vitesse de séchage, le taux de rétraction et leurs conséquences sur la capacité de réhydratation des légumes séchés.

Séchage solaire

La conception d'un séchoir solaire a été réalisée avec lequel des essais de séchage de trois des six légumes (pomme de terre, ail et oignon).

Le séchoir confectionné atteint des températures allant jusqu'à 72°C avec une moyenne de 65 °C. Au cours du séchage de la pomme de terre, oignon et ail, la température enregistrée est comprise entre 54,5 ±5,1 et 60,5 ±3,1 °C pour trois légumes.

Le séchage des deux épaisseurs de découpe (rondelles et tranches) démarrent à des vitesses de séchage initiales différentes. La plus élevée est assurée par la petite épaisseur correspondant à des teneurs en eau initiales X_{mi} de 5 mm plus faible que celle de 8 mm.

La durée totale de séchage est plus courte pour la petite épaisseur (11h à 15h) que celle de la plus épaisse (16 h à 25 h) pour les trois légumes testés.

La teneur en eau finale atteinte est inférieure 12 % sur base sèche (10,7 % sur base humide) assurant la préservation du produit. les teneurs en eau résiduelles les plus faibles sont obtenues par l'épaisseur la plus faible .

L'allure générale de séchage se déroule en phase de séchage à vitesse décroissante, pour l'ensemble de courbes de séchage des trois légumes.

Les courbes de vitesses de séchage des trois légumes sont subdivisées en deux sous phases. Une première sous phase relative à l'évaporation de l'eau faiblement liée (eau capillaire) avec une quantité éliminée plus élevée avec 5 mm que celle de 8 mm La deuxième sous phase est plus longue que la première avec diminution de la vitesse de séchage. Elle correspond à l'élimination de l'eau de plus en plus liée qui est difficile à extraire.

L'effet de l'épaisseur est très significatif sur la cinétique de vitesse de séchage où l'épaisseur de 5,0 mm est plus intéressante à sécher par ce type de séchage solaire indirect dont les qualités du produit sont préservées.

Conclusion générale

Notre étude a consisté à suivre l'évolution du séchage par convection d'air chaud de six légumes ; carotte, courgette, cardon, pomme de terre, ail et oignon.

L'étude de leur comportement au séchage a été réalisé avec un sécheur armoire fonctionnant en discontinu par convection forcée d'air chaud et au moyen d'un sécheur solaire fonctionnant par séchage indirect à convection d'air naturelle.

Nous avons établi des courbes de cinétique de vitesse de séchage des légumes en fonction de deux paramètres : température et épaisseur de découpe.

La variation de la température et de l'épaisseur de découpe a montré des effets significatifs. Ces effets nous ont permis d'approcher les phénomènes de transferts de masse se déroulant au cours du séchage. Les teneurs en eau résiduelles permettant la préservation du légume aux environs de 10 % sur base sèche ont été atteintes pendant des durées de séchage variables en fonction des deux paramètres (température et épaisseur de découpe); entre 1h 30 min et 10h, dans le sécheur armoire, et entre 10 et 25 h dans le sécheur solaire.

Le séchage se déroulant à vitesse décroissante avec une deuxième sous phase assez lente de 68 et 92 % de la durée totale du séchage.

Le comportement des légumes en cours et après séchage a été approché par le suivi de la rétraction et déformation des morceaux de découpe. Des taux de rétraction de plus de 70 % par rapport à l'état initial des morceaux de découpe épais ont été atteints en fin de séchage chez certains légumes. Les observations du changement de la couleur ont été suivies par des prises de vues. Ces dernières ont montrées l'effet de la température et de la dimension sur la qualité du produit par un brunissement en surface et à l'intérieur du tissu des morceaux de légumes les plus épais à 85 °C surtout (courgette, pomme de terre, ail et oignon).

L'activité de l'eau des six légumes séchés est entre 0,047(ail) et 0,076 (courgette) pour une teneur en eau résiduelle entre 0,02 et 0,13 g/g b.s.

La capacité de réabsorption d'eau des six légumes après séchage a été appréciée par des tests de réhydratation par rapport à la teneur en eau initiale de chaque légume. Les résultats de ces tests ont été conséquents par rapport aux effets de la température de séchage et des tailles de découpe, surtout par rapport à la composition biochimique de chacun d'eux. Les taux de réhydratation chez la carotte et l'ail respectivement 88 et 107,7 % avec la petite épaisseur de

découpe et la température la plus faible 60 °C ; et plus de 111 % atteint par le cardon avec les tranches de 5,8 et 8,8 mm à 85 °C. Les taux les plus faibles sont obtenus avec la courgette et la pomme de terre qui n'ont pas dépassé les 43 % avec la petite épaisseur séchée à 85 °C. L'oignon atteint 72,8 % avec l'épaisseur de 6,0 mm séchée à 60 °C.

La reprise de la taille et de la forme après réhydratation est quasi-totale. De même que la récupération de la couleur originelle des légumes n'ayant pas subi de brunissement est observée chez les différents légumes (carotte, ail et cardon).

Cependant, vu la nature des légumes et leurs formes variées; la découpe ne permet pas d'obtenir des morceaux très homogènes. La méthode de constitution des lots et le travail en discontinu lors du suivi des cinétiques, des tracés des courbes de séchage ainsi que le comportement des légumes ont présentés des difficultés dans la réalisation de ce travail.

Les performances du séchoir que nous avons confectionné ont été satisfaisantes. Avec ce séchoir nous avons pu réaliser des essais de séchage et atteindre des teneurs en eau finales qui permettent la préservation des légumes. Le gain en température issue de l'effet de serre et de l'absorption de la chaleur par les deux couches de charbon est entre 21 et 25 °C.

Les courbes expérimentales de cinétique ont montré une évolution régulière étant donné qu'un seul lot d'échantillon a été suivi au cours du séchage.

Les performances du séchoir solaire peuvent être améliorés en vue d'atteindre des températures plus élevées et d'obtenir un gain de temps plus conséquent

Perspectives

- Le sécheur armoire peut être amélioré par l'installation d'équipements adéquats pour la mesure de la température sèche et humide, et la mesure de la vitesse de l'air de séchage;
- et un équipement adapté pour un séchage en continu donnerait probablement des tracés plus précis.
- Augmenter la quantité du corps noir (charbon) pour améliorer la capacité d'accumulation et d'absorption des rayons solaires générant l'augmentation de la température;
- ajouter éventuellement des miroirs orientés de façon à diriger et converger les rayons solaires vers le corps d'absorption et de génération de chaleur;
- installer éventuellement un ventilateur pour créer la convection forcée et améliorer éventuellement la vitesse de séchage afin d'optimiser et améliorer le séchage (gain de temps):

- tester le séchage avec des quantités de produit plus importantes pour tester ses capacités
- une étude complémentaire en vue de vérifier les pertes en vitamines et composants aromatiques s'avère nécessaire étant donné la richesse des légumes en ces composants et les effets du séchage sur leur qualité.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- 1— AKANBI TAIWO Ch, ADEYEMI SIKINE Re, OJO A, (2006)
Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices
In journal of food Engineering; 72,157-163

- 2—AKPINAR KAVAK E. (2006)2
Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetable and fruits
In journal of food Engineering, 73; 75-84 - Elsevier ltd.

- 3—ALAIS C. ; LINDEN G. ; MICLO L. (2004)
Abrégé de Biochimie Alimentaire
5^{ème} édition- éd Duno p245.

- 4—Anonyme (1997)
La courgette
Dans journal de pédiatrie et de puériculture n°2
Extraits du bulletin de l'APRIFEL,1996. Pp 126-127.

- 5— Anonyme (1998)
Site Internet- ITCF Etude Agrice

- 6—BASSEY MICHAEL W. (1983)
L'énergie solaire comme source de chaleur pour le séchage des récoltes en Sierra Leone. Dans
Séchage des produits alimentaires
Compte rendu du colloque tenu à Edmonton, Alberta du 06 au 09 juillet 1981.
Edition microfiche CRDL - Ottawa Ontario Canada Pp 77-85

- 7— BIMBENET J.J, (1984)
Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires
Dans les cahiers du Génie Industriel Alimentaire (GIA)
Edité par la Sepaic/Paris 2^{ème} édition p 34.

- 8—BIMBENET J J, et TRYSTRAM G. (1993)
Evolution du génie industriel alimentaire
I A A, Novembre décembre 1993 (N°11-12)

- 9—BIMBENET J.J, DUQUENOY A, TRYSTRAM G. (2002 a)
Séchage, cuisson, cuisson-extrusion
Dans Génie des Procédés Alimentaires des bases aux applications
Editions RIA-DUNOD- Paris pp 391-427 (p554)

- 10—BIMBENET J.J, BONAZZI C, DUMOULIN E. (2002 b)
L'eau en séchage, stockage et réhydratation
Dans l'eau dans les aliments par LE MESTE M ; LORIENT D. et SIMATOS D ; Edition Tec
et Doc. PARIS pp 525-546 (P 674)

- 11—BITON M. (1999)
La conserve appertisée (Pp319-336)
Dans Technologie des légumes par TIRILLY Y. BOURGEOIS C M.
Collection sciences et techniques agroalimentaires
Éditions Tec et Doc Paris –Londres- New York p558

- 12—BITON M. (1999)
 Les surgelés (pp337-347)
 Dans Technologie des légumes par TIRILLY Y. BOURGEOIS C M.
 Collection sciences et techniques agroalimentaires
 Éditions Tec et Doc Paris –Londres- New York p558
- 13—BLOND G et LE MESTE M. (1988)
 Propriétés d’hydratation des macromolécules ; Relation avec leurs propriétés fonctionnelles
 Dans ; Propriétés fonctionnelles des macromolécules alimentaires Par LORIENT D, COLAS B, LE MESTE M.
 Les cahiers de l’ENSBANA –Edition Lavoisier Tec et Doc.
- 14—BOARD B W.(1987)
 Le contrôle de la qualité dans l’industrie du traitement des fruits et légumes
 FAO ; Etude FAO Alimentation et nutrition N°39-Cahiers techniques de la FAO.
- 15—BOUGUELIA A, LE GOFF P et OUAHES R. (1992)
 Séchage des denrées agricoles par pompe à chaleur à absorption à cycle ouvert
 I A A N° 11 Novembre 1992.
- 16—BOURGEOIS C M. (2003)
 Les vitamines dans les IAA
 Editions Tec et Doc.
- 17—BURDEN J et WILLS R.B H. (1992)
 Prévention des pertes après récolte:Fruits, légumes, racines et tubercules
 Collection FAO ; formation N° 17/2 Rome.
- 18—Catalogue Néerlandais de variétés de Pommes de Terre, (1997)
 NIVAA, LA HAYE ; Imprimé aux Pays –Bas par Boom-Planeta B V Harleem
- 21— CHARMA G.P, PRASAD S.(2001)
 Drying of garlic (*allium sativum*) cloves by microwave hot air combination
 In journal of food Engineering; 50, 99-105.
- 19— CHARREAU A, et CAVAILLE R. (1991)
 Séchage Théorie et calculs
 Dans Techniques de l’Ingénieur, Traité de génie des procédés, J2480 -p23.
- 20— CHAUX Cl., FOURY Cl. (1994)
 Production légumière - tome1
 Généralités (série Agriculture d’aujourd’hui)
 Edition Tec et Doc Lavoisier Paris, Londres, New York.
- 21— CHEFTEL J.C, CHEFTEL H. (1984)
 Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments
 Volume 2 ; Edition Lavoisier Tec et Doc, (p 420)
- 22— CINAR I. (2004)
 Carotenoid pigment loss of freeze-dried plant samples under different storage conditions
 In LWT (Lebensun-wiss-u.technologies); 37,363-367.

- 23— CLEMENT J.M. (1981)
« Larousse agricole »
Librairie Larousse Paris p1208.
- 24— CLERGEAND Chantal et Lionel, (1997)
Les fruits du soleil: Abricot sec, Banane séchée, Châtaigne, Dattes, Figues sèche,
Pruneau, Raisin sec
Collection "cuisine et santé" -Edition Equilibres -Aujourd'hui
- 25— COLAS B. (2003)
Propriétés structurantes de l'eau dans les légumes et dans les fruits ; influence sur la texture
Dans l'eau dans les aliments par LE MESTE M ; LORIENT D. SIMATOS D ; Edition Tec et
Doc Paris p674
- 26— COME Daniel ,1991
Altération des produits végétaux entreposés
I A A N° 6 JUIN 1991
- 27— DAUDIN J D, BIMBENET J J. (1982)
Détermination expérimentale du comportement des produits solides lors du séchage par
entraînement
I A A ,1982,Volume 99 ,(N°4)
- 28— DO AMARAL SOBRAL P.J, LEBERT A, BIMBENET J.J, (2001)
Effet du séchage sur le rétrécissement des cubes de pomme de terre
Dans science des aliments, vol 21, N°3-pp 231-242.
Lavoisier abonnements Paris
- 29— ELLISECHE D. (1999)
La pomme de terre (pp65-91)
Dans Technologie des légumes
par Tirilly Y. Bourgeois C M.
Collection sciences et techniques agroalimentaires
éditions Tec et Doc Paris –Londres- New York p558
- 30— Encyclopédie de la cuisine (1999)
Les Editions Québec Amérique inc.
- 31— ERARD P. (2002)
La courgette
C.t.i.f.l. (Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes
Edition Buguet comptour, Macon-Ctifl- Paris. p 145
- 32--- FAO STAT (2004)
Microsoft Encarta 2007 -1993-2006 Microsoft Corporation
- 33— FAO STAT (2006)
Site Internet:<http://Fr.Wikipedia.org>

- 34-- FAVIER J.C, IRELAND RIPET J, TOQUE C, FEINBERG M. (1995)
« Répertoire général des aliments » Table de composition INRA, CNEVA, Ciquial
Tec et Doc /Paris p 897.
- 35-- GENIN N & RENE F. (1996)
Influence of rate and the ripeness of fresh courgette on the quality of freeze dried products
and freeze drying time
In journal of food Engineering, 29; 201-209
- 36—HATAMIPOUR M.S, MOWLA D. (2002)
Shrinkage of carrots during drying in a inert medium fluidized bed
In journal of food engineering
Elsevier science ltd.
- 37—JOHNSON P-N.T, BRENNAN J.G, & ADDO YOBO F.Y.(1998)
Air drying characteristics of plantain (Musa A.A.B)
In Journal of food Engineering 37 (pp233-242)
Elsevier Science limited- Printed in Great Britain.
- 38—KECHAOU N, BAGANE M, MAALEJ M, KAPSEU C, (1996)
Approche empirique de la cinétique de séchage des dattes
Article dans Science des aliments, N° 16 ; 593-606.
- 39—KOMPANY E, ALLAF K, BOUVIER J M, GUIGNON P, MAUREUX A. (1990)
Nouveau procédé de déshydratation des fruits et légumes à réhydratation rapide
I A A, Décembre 1990(N°12)
- 40—KROKIDA M.K, KARATHANOS V.T, MAROULIS Z B, MARINOS KOURIS D.
(2003)
Drying kinetics of some vegetables
In journal of food Engineering; 59,391-403
- 41—LEERATANARAK N, DEVAHASTIN S, CHIEWEHAN Na, (2005)
Drying kinetics and quality of potato chips undergoing different drying techniques
In journal of food Engineering, in press.
- 42—LE GUERN J.(1989)
Les légumes fermentés
Dans microbiologie alimentaire volume 2
Les fermentations alimentaires Par BOURGEOIS C M, LARPENT J P.
Edition Lavoisier Tec et Doc, série APRIA. ;(pp 137-149)
- 43—LE MESTE M, COLAS B (1990)
L'eau dans les procédés de transformation et de conservation des aliments
Série des cahiers de l'ENSBANA, N°7
Edition Lavoisier Tec et Doc (P 278)

- 44—LESCANO C. (1983)
 Le séchage des pommes de terre (*papa seca*) au Pérou
 Dans séchage des produits alimentaires
 Compte rendu du colloque tenu à Edmonton, Alberta du 06 au 09 juillet 1981
 Canada-Ottawa Ontario CDRL p 110.
- 45—LOUKA N, ALLAF K. (2004)
 Expansion ratio and color improvement of dried vegetables by a new process” Controlled Sudden Decompression to the vacuum”
 Application to potatoes, carrots and onions
 In journal of food Engineering; 65,233-243.
- 46—MA RAO et S.S.H.RIZVI (1995)
 Engineering properties of foods
 Marcel Dekker- INC 2^{ème} édition. p531
- 47—MAFART P. (1991)
 Génie Industriel Alimentaire tome 1
 Les procédés physiques de conservation
 Edition Lavoisier Tec et Doc, série APRIA, (p295)
- 48—MAY B.K, PERRE P. (2002)
 The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux in food stuffs
 In journal of food Engineering, 54; 271-282 -Elsevier-
- 49—MERGNAT T, FRITSCH P, FERRANDES B, SAINT BLANQUAT G, (1994)
 Influence du blanchiment et du séchage sur les teneurs en nitrates et nitrites des quelques légumes
 I A A Volume 111, juin 1994 (N°6)
- 50—MISSIRIAN Ch., (1989)
 Les perspectives industrielles du séchage à la vapeur d’eau surchauffée avec CMV
 I A A, Janvier février 1989(N°1-2)
- 51—MONGPRANEET S, ABE T, TSURUSAKI T, (2002)
 Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions
 In journal of food Engineering; 55,147-156.
- 52—MULTON J L, (1991)
 Techniques d’analyses et de contrôle dans les IAA
 Tome 4, Collection Sciences et Techniques Agro-alimentaires
 Edition Tec et Doc APRIA.
- 53— NINDO C.I.,SUN T.,WANG S.W.,TANG J.,POWERS J.R. (2003)
 Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in Asparagus (*Asparagus officinalis*,L.)
 In Swiss society of Food science and Technology
 Published by Elsevier Ltd
 Lwt (Lebensm.-Wiss. U.Technol. 36 pp 507-516

- 54—NOUMI G.B., NGAMENI E., KAPSEU C., BROTO F. (2003)
 Isothermes de désorption d'eau dans les fruits de l'aiélé
 (*Canarium schweinfurthii* Engl.)
 Dans science des aliments An international journal of food science and technology
 Edition Lavoisier - Vol 23 N° 2 pp 264-272
- 55— PRAKASH S, JHA S.K, DATTA N, (2004)
 Performance evaluation of blanched carrots dried by three different driers
 In journal of food Engineering, 62; 305-313 – Elsevier ltd.
- 56— RENAUD V. (2003)
 Tous les légumes courants, rares ou méconnus, cultivables sous nos climats
 Les éditions Eugen Ulmer Paris p 224
- 57— RENE Frederic, GENIN Noël, SCHOTT Gérard, (1996)
 Maîtrise de la qualité sensorielle des produits déshydratés en relation avec la matière
 première et les conditions opératoires de la lyophilisation
 I A A Volume 113 N° 87 Mars (1996) (N°3)
- 58— RIZVI S.S.H.(1995)
 Thermodynamic properties of foods in Dehydration pp223-309
 Dans Dans Engineering properties of foods
 par MA RAO et S.S.H.RIZVI
 Marcel Dekker- INC 2^{ème} édition. p531
- 59— ROUX Jean L, (1994)
 - Conserver les aliments : comparaison des méthodes et des technologies :
 --des méthodes industrielles de conservation alimentaire (pp 55-84)
 --Procédés de techniques simples, de caractère naturel, artisanal (pp85-91)
 --Les technologies de déshydratation réduction (pp 407-459)
 Edition Lavoisier Tec et Doc.
- 60— ROVEDO C.O,SUAREZ C and VIOLLAZ Pa,(1998)
 Analysis of moisture profiles, Mass Biot Number and drying forces during drying of potato
 slices.
 In journal of food Engineering; 36,211-231.
- 61— RUIZ LOPEZ I.I, CORDOVA A.V, RODRIGUEZ JIMENESG.C, GARCIA
 ALVARADO M.A, (2004)
 Moisture and temperature evolution during food drying: effect of variable properties
 In journal of food Engineering, 63 (2004) ;117-124 - Elsevier.
- 62— SAM SAGUY I, MARABI A, WALLACH R, (2005)
 Liquid imbibition during rehydration of dry porous foods
 In innovative food science & Engineering Technologies
 Elsevier; p1-7.

- 63— SARAVACOS George D. (1995)
 Mass transter properties of foods pp 169-221
 Dans Engineering properties of foods
 par MA RAO et S.S.H.RIZVI
 Marcel Dekker- INC 2^{ème} édition. p531
- 64—SARSAVADIA P.N, SAWHNEZ R.L, PANGAVHANE D.R, SINGHS.P.(1999)
 Drying behaviour of brined onion slices
 In journal of food Engineering; 40,219-226.
 Printed in Great Britain - Elsevier science limited.
- 65— SEVERINI C,DE PILLI T,BAIANO A,MASTROCOLA D,MASSINI R,(2001)
 Preventing enzymatic browning of potato by microwave blanching
 Dans science des aliments N°2, vol 21 ; 149-160, Lavoisier abonnement, Paris.
- 66—SOUCI S.W, FACHMANN W, KRANT H, (1994)
 La composition des aliments ; Tableaux de valeurs nutritives
 5ème edition medpharm, CRC preo/Germany, p 1091.
- 67—SOUTY Michel, (1991)
 Adaptation du matériel végétal à la qualité des produits transformés
 I A A N° 6 JUIN 1991
- 68—SRIKIATDEN J, ROBERTS J.S.(2006)
 Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot
 air and isothermal drying
 In journal of food Engineering, 74; 143-152 – Elsevier ltd. science direct.
- 69— TIRILLY Y et THOUVENOT D. (1988)
 Fruits et légumes
 Dans Microbiologie alimentaire volume 1:Aspect microbiologique de la sécurité et de la
 qualité alimentaire par BOURGEOIS C M, MESCLE J F, ZUCCA J.
 Edition Lavoisier Tec et Doc, Série APRIA. ; (Pp 265-278)
- 70— VILLENEUVE F. (1999)
 La carotte (pp45-63)
 Dans Technologie des légumes par TIRILLY Y et BOURGEOIS CM
 Collection science et techniques agro alimentaires. Edition Lavoisier Tec et Doc Paris.p558
- 71—VOILLEY A et MOYNE C. (1990)
 Le séchage ; (pp 149-170)
 Dans L'eau dans les procédés de transformation et de conservation des aliments
 Par LE MESTE M et COLAS B
 Les cahiers de l'ENSBANA n°7 .Edition Lavoisier Tec et Doc p277
- 72— WANG J, XI Y.S. (2004)
 Drying characteristics and drying quality of carrot using a two stage microwave process
 In journal of food Engineering; p7
 Elsevier ltd.

73—ZIDOUNE M.N. (2002)
Le séchage
Extrait du cours de Génie Industriel Alimentaire
Editions de l'Université Mentouri de Constantine p 81

ANNEXES

ANNEXE 1 :

Courbes des cinétiques de séchage des légumes étudiées: $X_m = f(t_m)$

Carotte:

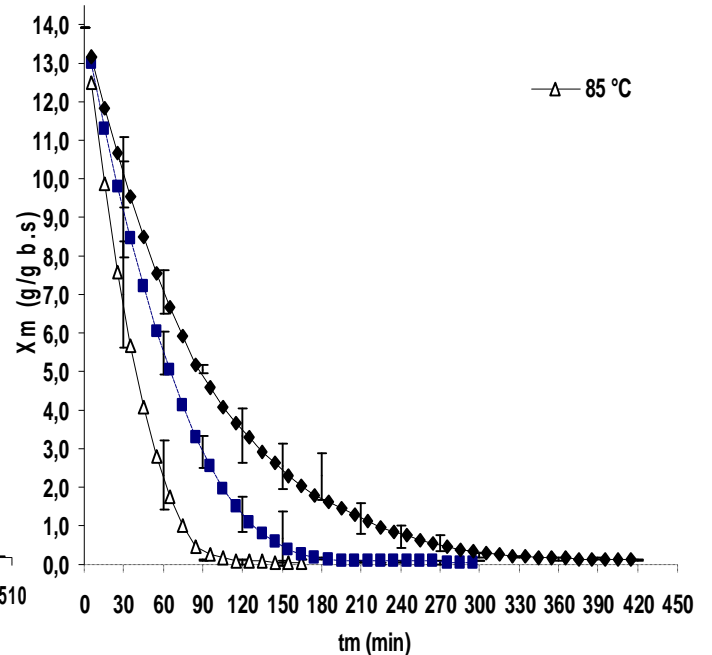
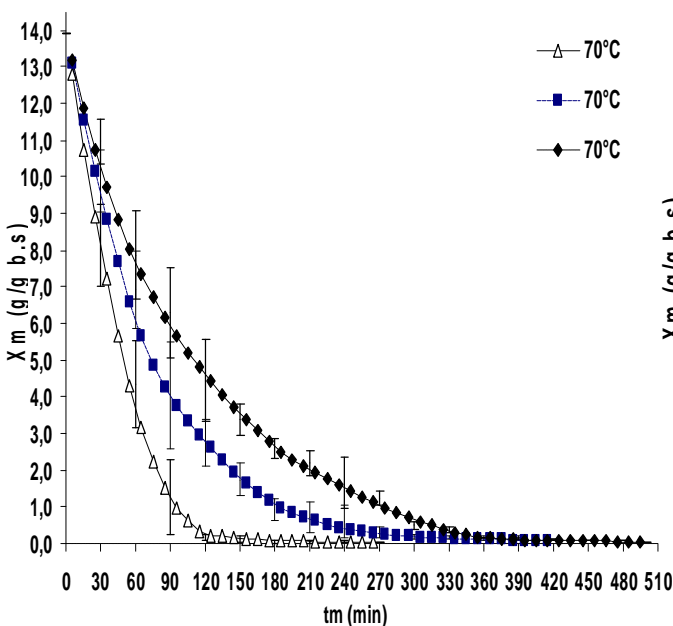
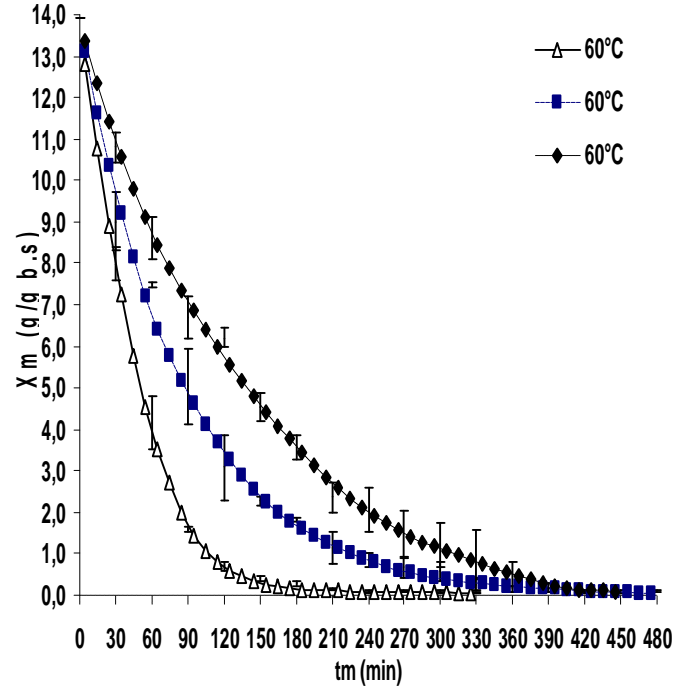
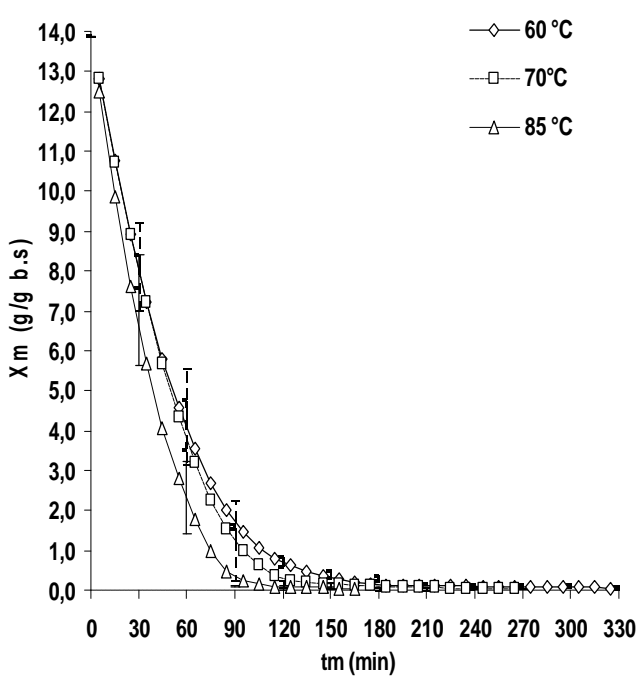
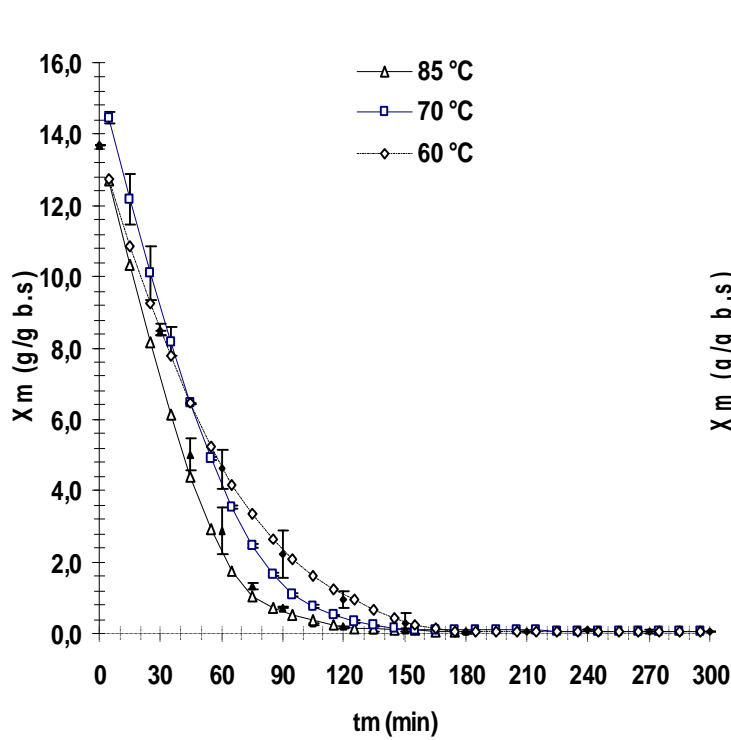


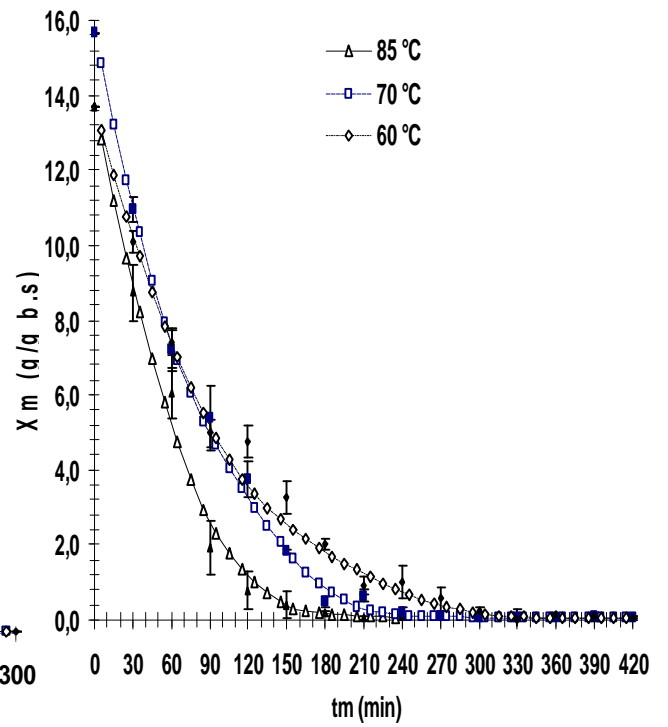
Figure 7a : Effet de l'épaisseur de découpe sur la cinétique de séchage de rondelles de carotte à 70°C, $X_m = f(t_m)$

Figure 8a : Effet de l'épaisseur de découpe sur la cinétique de séchage de rondelles de carotte à 85°C, $X_m = f(t_m)$

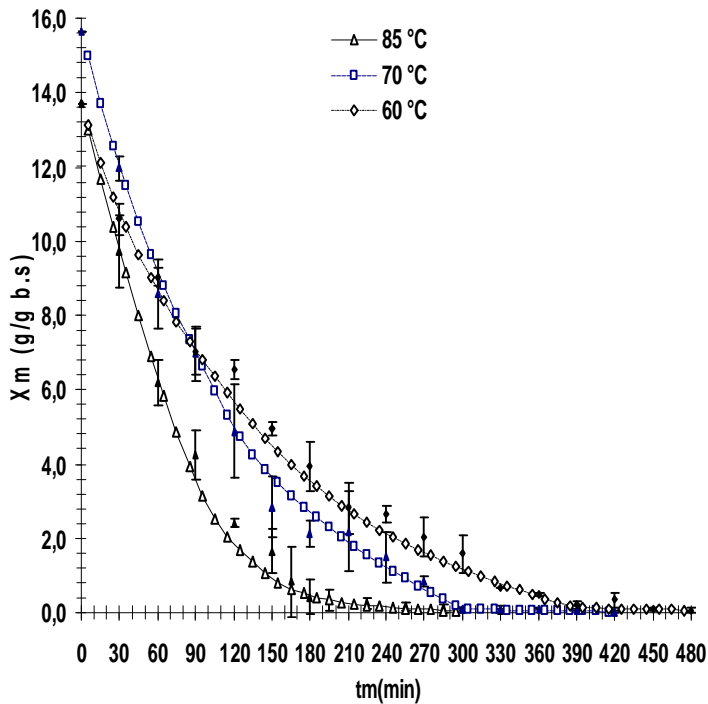
Courgette:



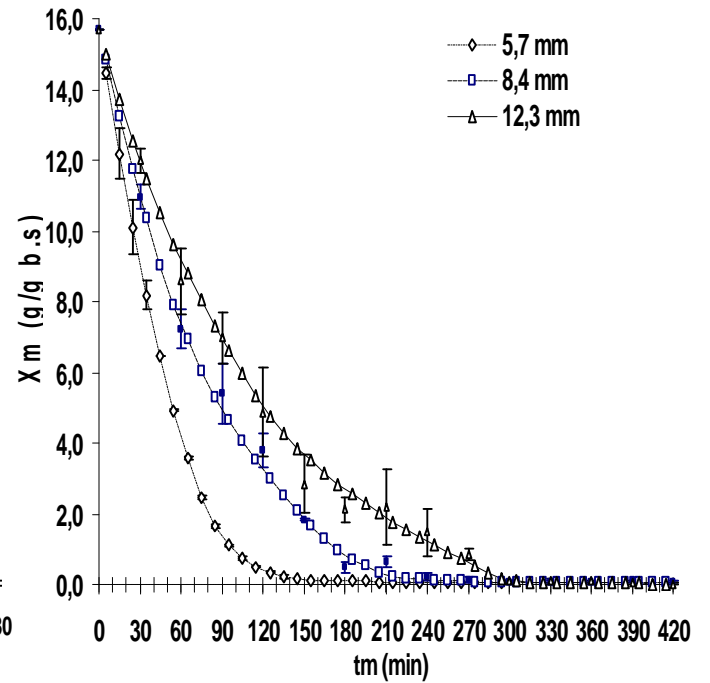
a : Cinétique de séchage de la courgette de 5,7mm d'épaisseur; $X_m=f(t_m)$



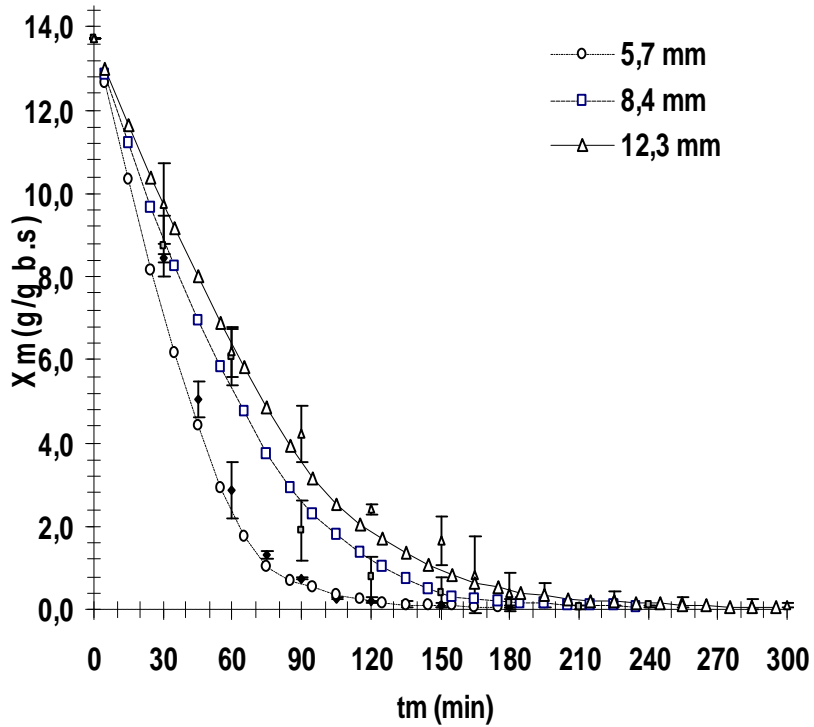
h : Cinétique de séchage de la courgette de 8,4 mm d'épaisseur ; $X_m=f(t_m)$



a : Cinétique de séchage de rondelles de courgette de 12,3mm d'épaisseur, à 60°C; $X_m=f(t_m)$

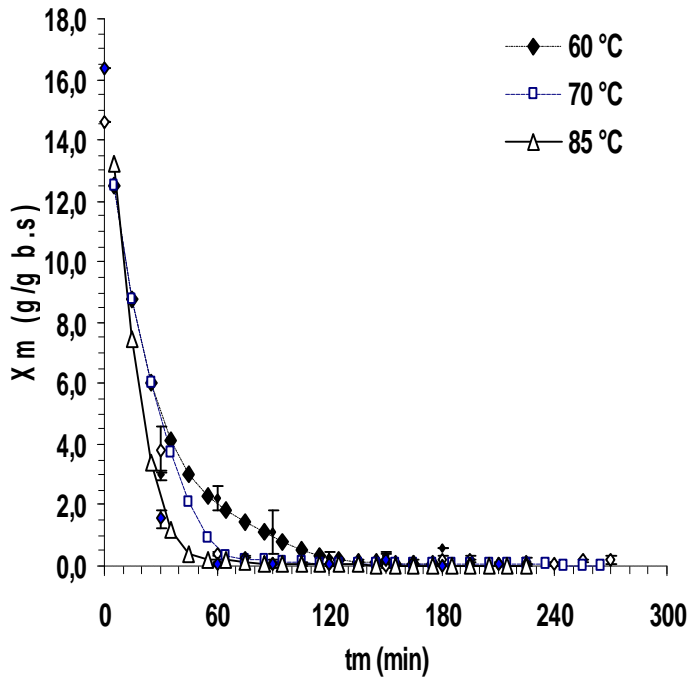


a : séchage de la courgette à 70°C ; $X_m=f(t_m)$

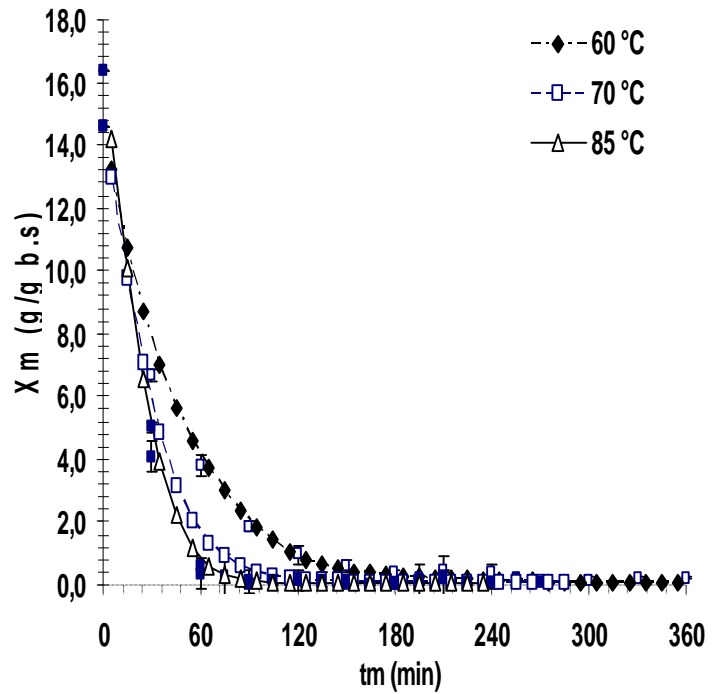


a : séchage de la courgette à 85°C ; $X_m=f(t_m)$

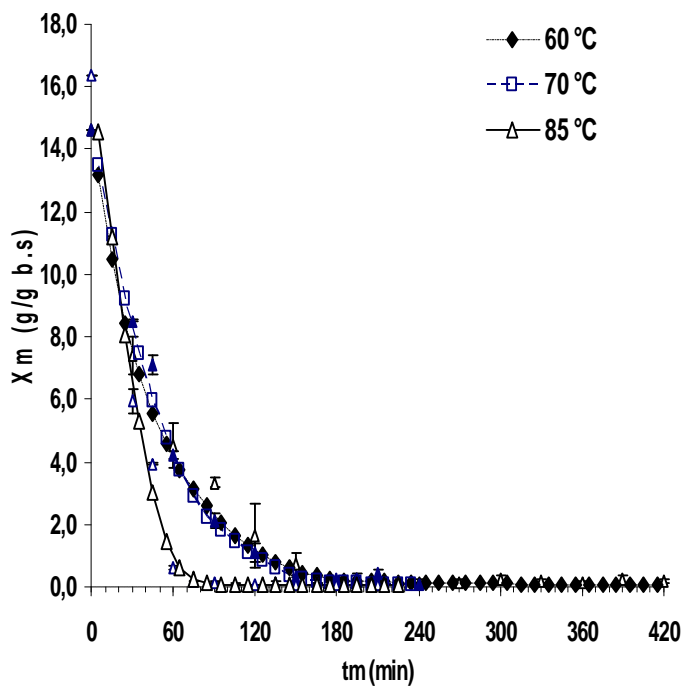
Cardon :



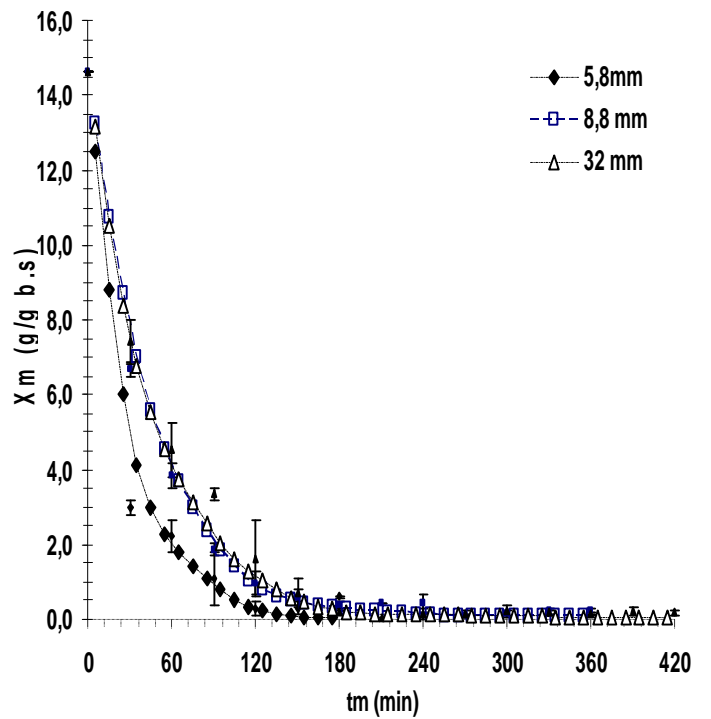
a : Cinétique de séchage de tranches de cardon de 5,8 mm d'épaisseur ; $X_m=f(t_m)$



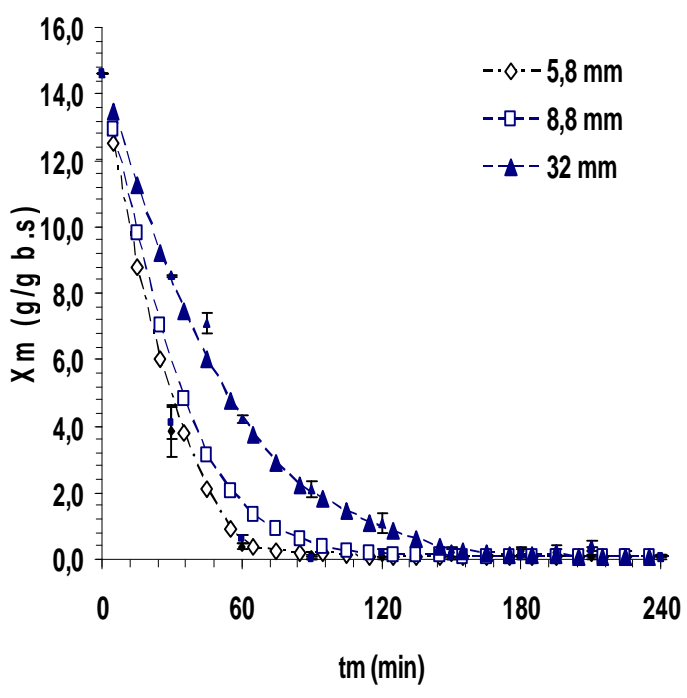
a : Cinétique de séchage de tranches de cardon de 8,8 mm d'épaisseur ; $X_m=f(t_m)$



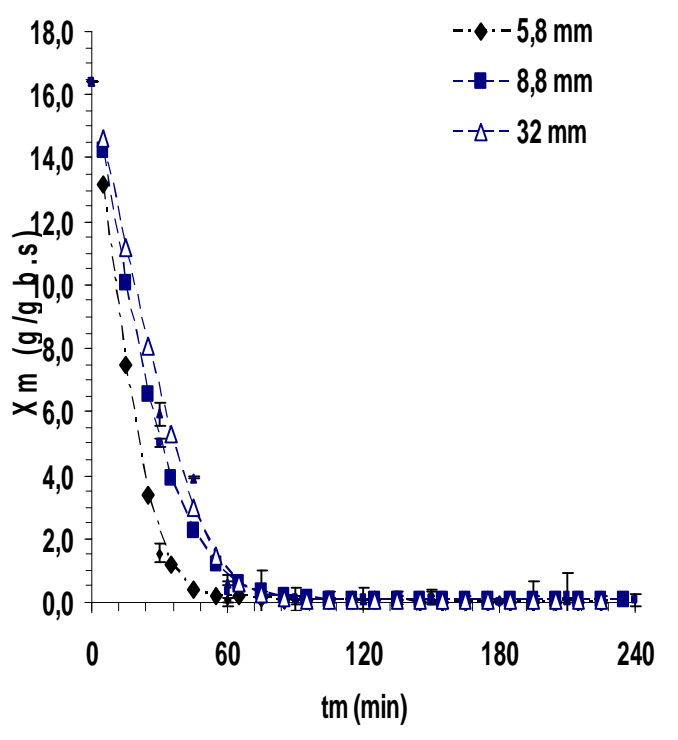
a : Cinétique de séchage de tranches de carton de 32 mm de longueur ; $X_m = f(t_m)$



a : Cinétique de séchage de tranches de carton à 60 °C ; $X_m = f(t_m)$

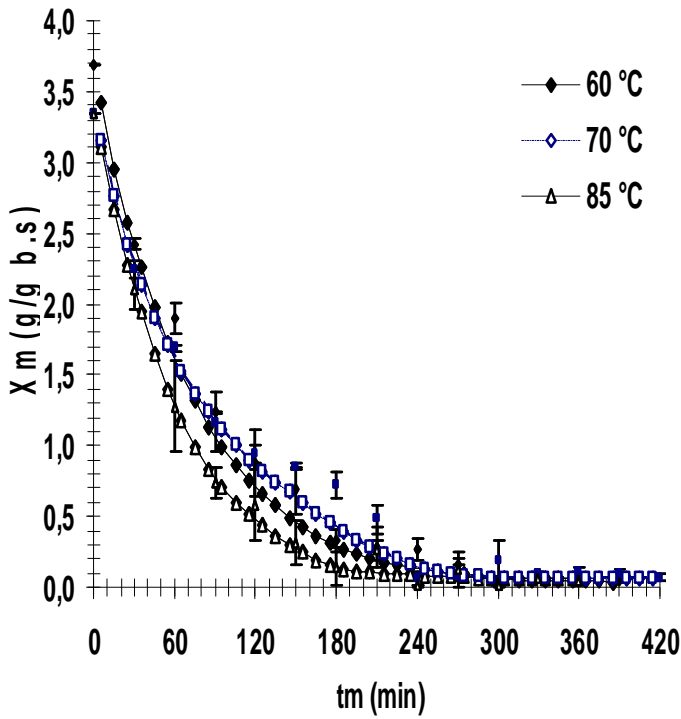


a : Cinétique de séchage de tranches de carton à 70 °C ; $X_m = f(t_m)$

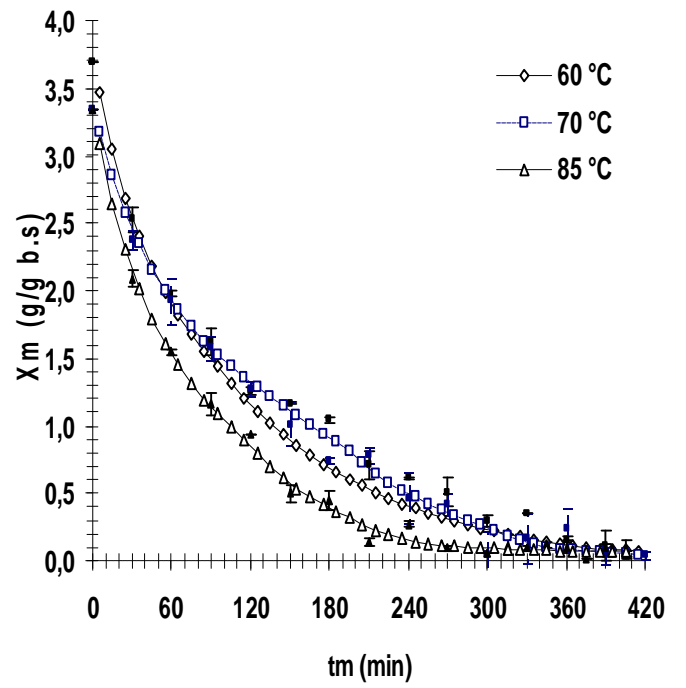


a : Cinétique de séchage de tranches de carton à 85 °C ; $X_m = f(t_m)$

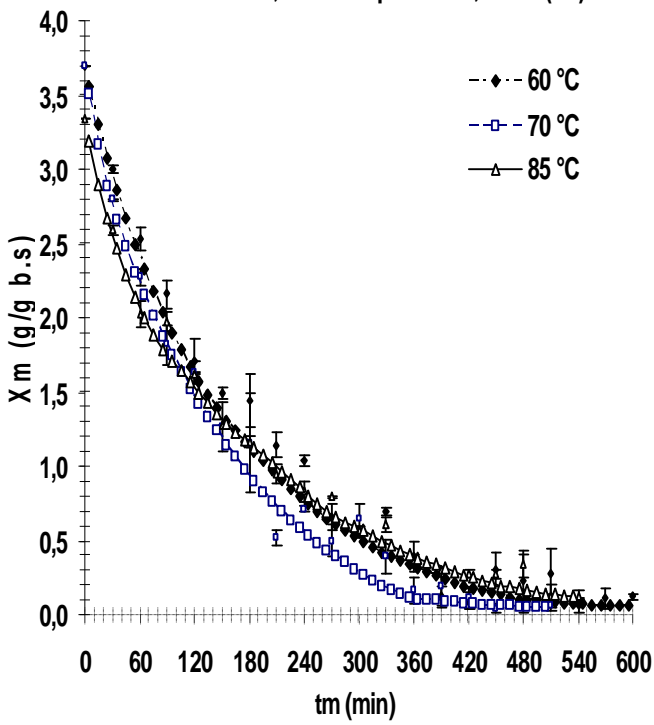
Pomme de terre:



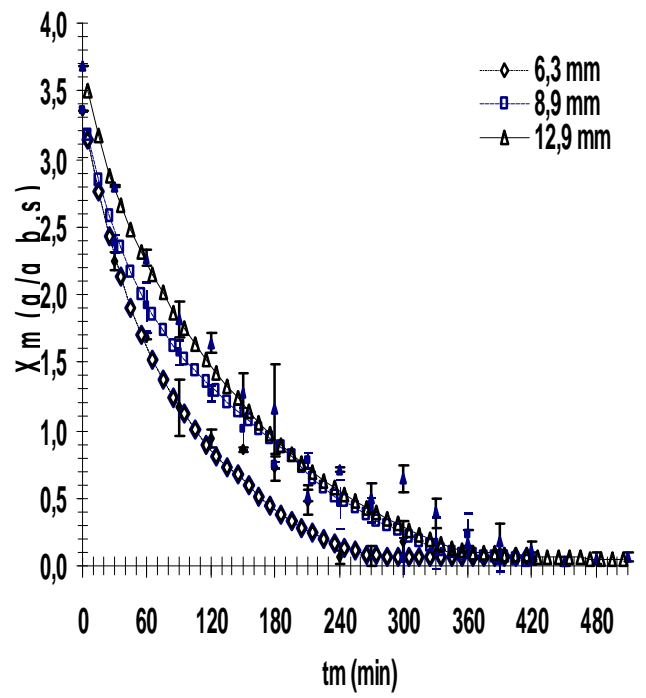
a : Cinétique de séchage de rondelles de Pomme de terre de 6,3 mm d'épaisseur; $X_m = f(t_m)$



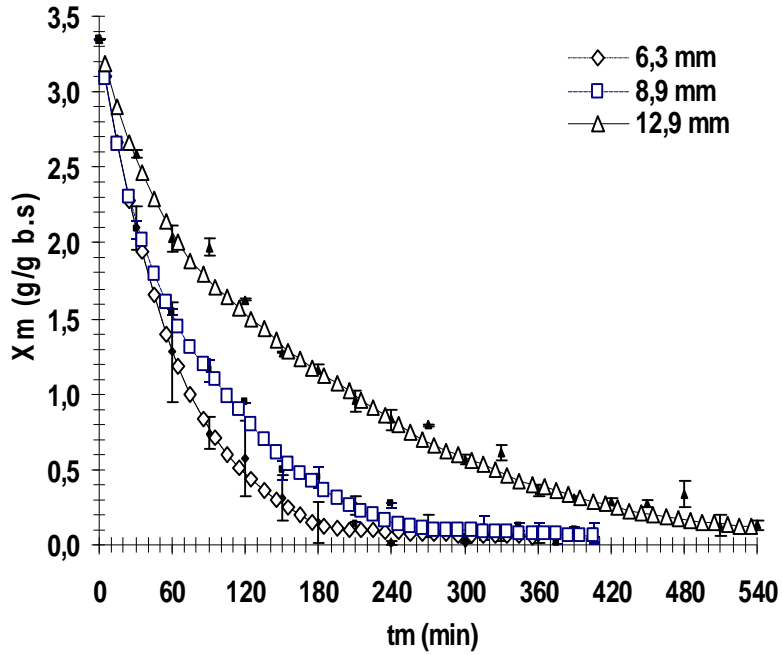
a : Cinétique de séchage de rondelles de Pomme de terre de 8,9 mm d'épaisseur; $X_m = f(t_m)$



a ; Cinétique de séchage de rondelles de Pomme de terre de 12,9 mm d'épaisseur; $X_m = f(t_m)$

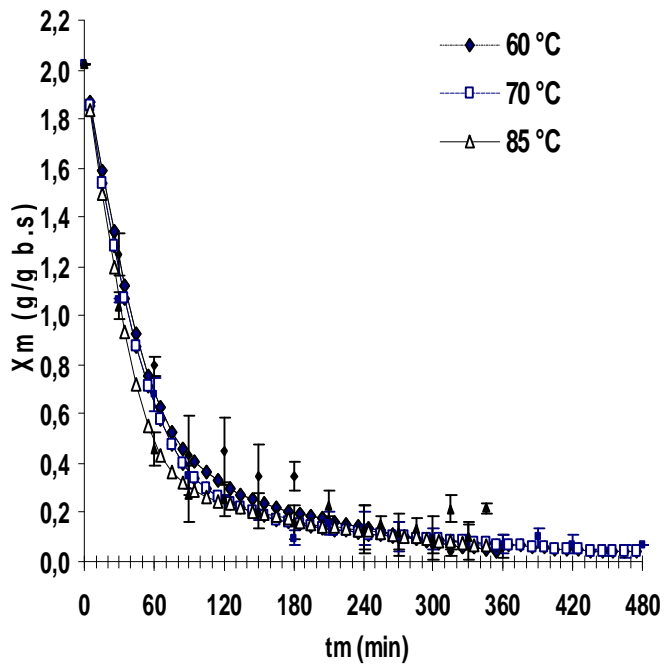


a : Effet de la découpe sur la cinétique de séchage de rondelles de Pomme de terre séchées à 70°C; $X_m = f(t_m)$

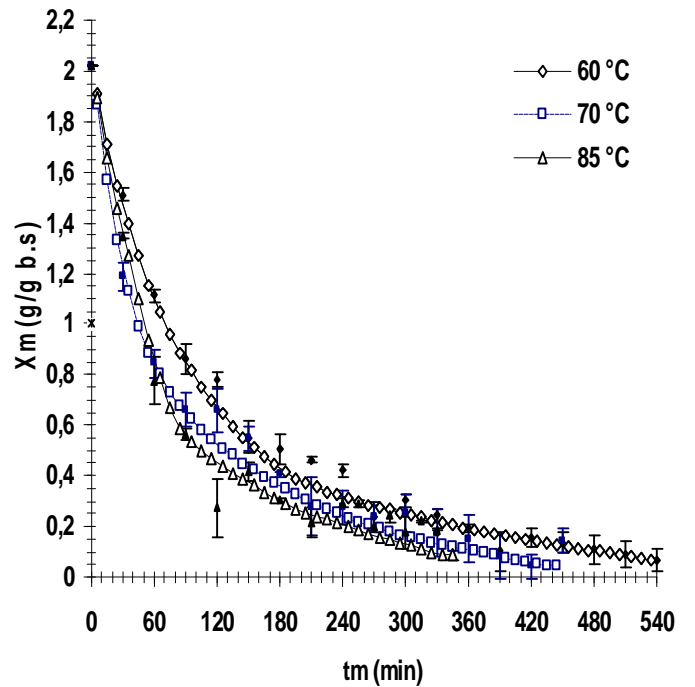


a : Effet de la découpe sur la cinétique de séchage de rondelles de Pomme de terre séchées à 85 °C; $X_m=f(t_m)$

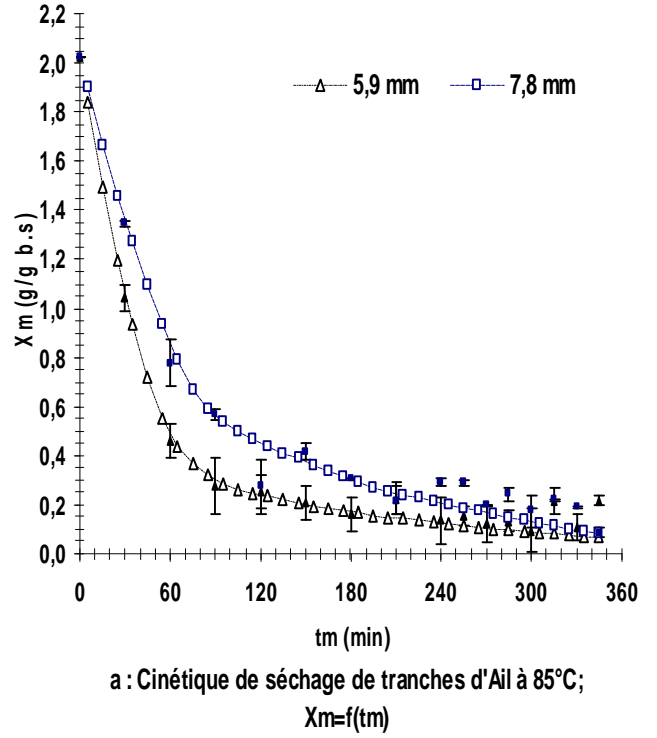
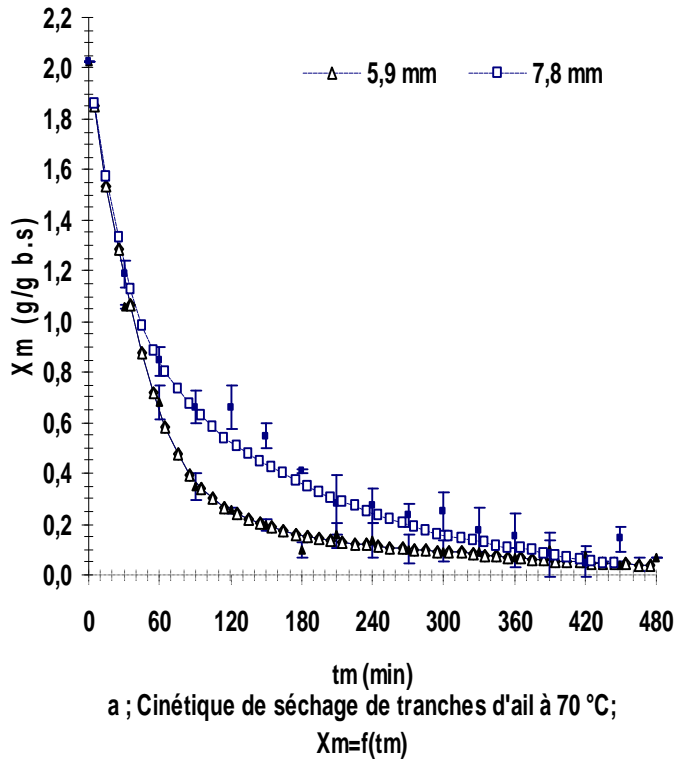
Ail :



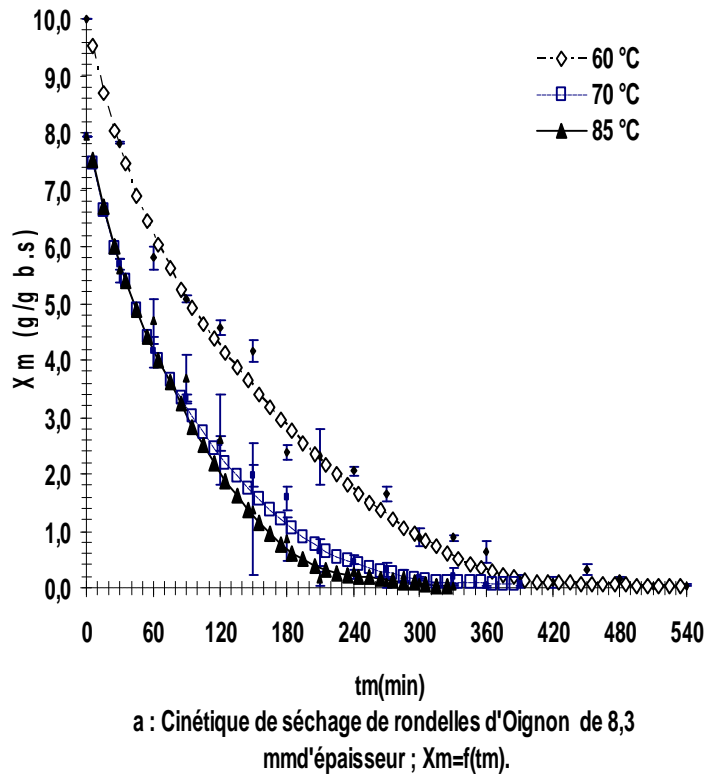
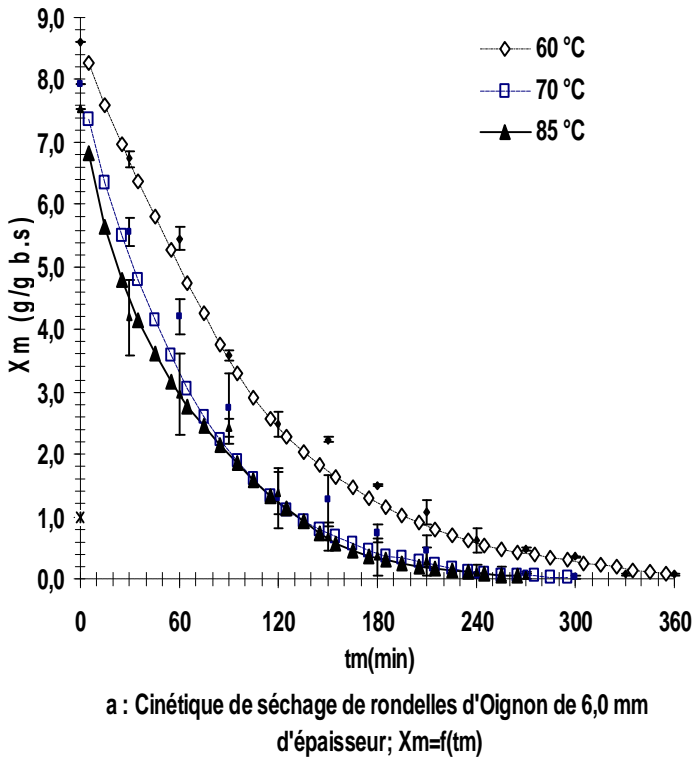
a : Cinétique de séchage de tranches d'Ail de 5,9 mm d'épaisseur ; $X_m=f(t_m)$

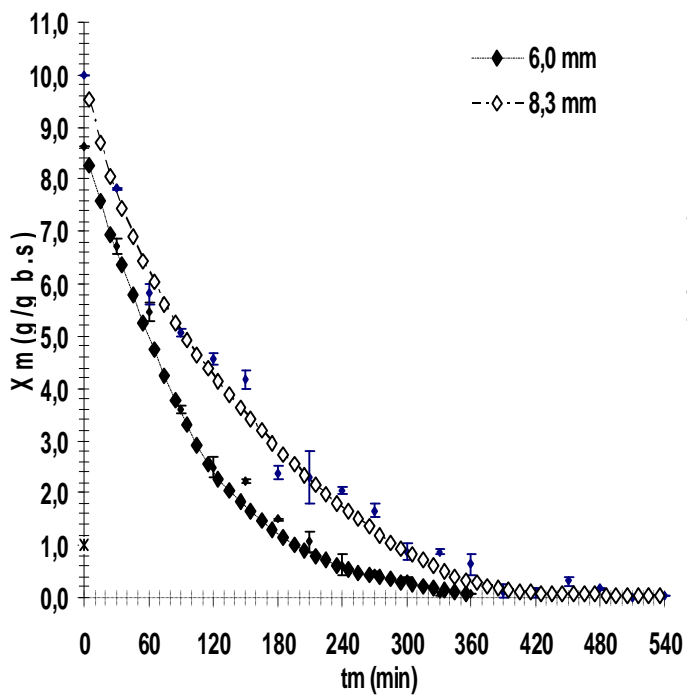


a : Cinétique de séchage de tranches d'Ail de 7,8 mm d'épaisseur ; $X_m=f(t_m)$

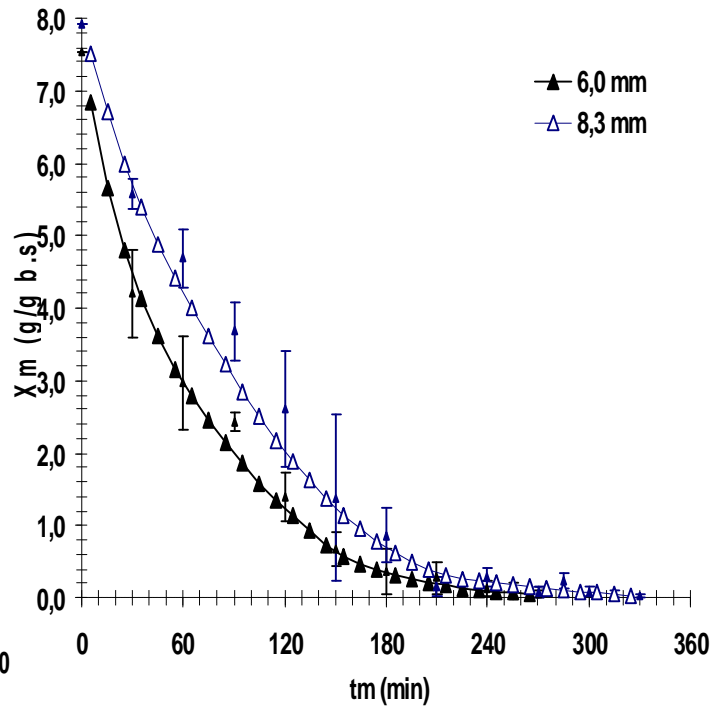


Oignon :





a : Cinétique de séchage de rondelles d'oignon à 60°C;
 $X_m=f(t_m)$.



a : Cinétique de séchage de rondelles d'oignon 85 °C ;
 $X_m=f(t_m)$.

ANNEXE 2 :

Tableaux de variations de temps ,de teneur en eau résiduelle et de vitesses de séchage des six légumes:

Tableau n° 12 : Valeurs des variations de temps, de teneur en eau résiduelle et de vitesse de séchage des rondelles de carotte par épaisseur et par température

ép t°	5,8mm			8,7mm			12,9mm		
	60°C	70°C	85°C	60°C	70°C	85°C	60°C	70°C	85°C
t _{mi}	5	5	5	5	5	5	5	5	5
X _{mi}	12,8 3	12,8	12,5	13,1	13,1	13,0	13,4	13,2	13,2
-(dX/dt) i	12,9	13,2	16,9	9,6	9,8	10,8	6,5	8,4	8,6
t _m inflexion	55	55	45	65	65	85	85	75	85
X _m inflexion	4,56	4,33	4,08	6,43	5,65	3,30	7,35	6,74	5,19
dX/dt inflexion	6,72	7,50	8,70	4,50	5,40	4,80	3,00	3,48	4,05
Δt inflexion	50	50	40	60	60	80	80	70	80
ΔX _m inflexion	8,27	8,48	8,42	6,68	7,44	9,70	6,01	6,46	8,00
Δ(dX/dt) inflexion	6,18	5,70	8,22	5,10	4,35	6,00	3,48	4,92	4,53
Δ t f (Δ t total)	325	265	165	475	415	295	445	495	415
Δ t 1 (X<10%bs)	245	185	115	425	395	195	445	405	415
X _{m1} <10%	0,09 8	0,09 1	0,09 8	0,09 5	0,09 7	0,09 8	0,10 1	0,09 9	0,12 0,12
X _{mf}	0,05 6	0,03 6	0,05 4	0,06 0,06	0,08 6	0,05 0,05	0,10 1	0,05 4	0,12 0,12
Δ X _{m1} <10%bs	12,7 3	12,7 1	12,3 9	13,0 1	12,9 9	12,9 0	13,2 6	13,1 0	13,0 7
Δ dX/dt (X<10%bs)	12,8 8	13,1 5	16,6 5	9,54	9,71	10,7 8	6,47	8,38	8,58
ΔX _{m1} à f	0,04 2	0,05 5	0,04 4	0,03 5	0,01 1	0,04 8		0,04 4	
Δ X _m f	12,7 7	12,7 6	12,4 4	13,0 4	13,0 0	12,9 5		13,1 5	
Δ (dX/dt) f	12,8 5	13,1 5	16,9 0	9,60	9,73	10,7 8		8,39	
Δ(dX/dt)1àf	0,02 4	0,00 6	0,25 2	0,06 0	0,01 8	0,00 0		0,00 6	
Δ t total	320	260	160	470	410	290	410	490	410
Δ X _m totale	12,7 7	12,7 6	12,4 6	13,0 4	13,0 0	12,9 5	13,2 6	13,1 5	13,0 7
Δ (dX/dt) totale	12,8 5	13,1 5	16,8 1	9,60	9,73	10,7 8	6,47	8,39	8,58
Δt de la 2 ^{ème} phase	270	210	120	410	350	210	360	420	325
Δt 2 ^{ème} phase/ Δt t%	83,1	79,2	72,7	86,3	84,3	71,2	80,9	84,8	79,3
Δ X _m :X _{minf} à X _{mf}	4,50	4,29	4,02	6,37	5,56	3,25	7,25	6,69	5,07

Tableau n° 16 : Valeurs des variations de temps, de teneur en eau résiduelle et de vitesse de séchage des rondelles de courgette par épaisseur et par température

ép	5,7±0,2 mm			8,4±0,4mm			12,3±0,4mm		
	60 °C	70°C	85°C	60°C	70°C	85°C	60°C	70°C	85°C
t °									
t _{mi}	5	5	5	5	5	5	5	5	5
X _{mi}	12,73	14,46	12,68	13,08	14,83	12,85	13,14	14,98	13,01
-(dX/dt) _i	11,7	14,46	14,7	7,5	10,0	10,2	6,72	8,16	8,28
t _{m inf}	65	65	55	105	85	75	85	75	65
X _{m inf}	4,18	3,55	2,93	4,27	5,30	3,75	7,30	8,06	5,84
dX/dt _{inf}	5,70	7,80	8,10	3,45	4,20	5,64	3,14	4,38	6,24
Δt _{inf}	60	60	50	100	80	70	80	70	60
ΔX _{m inf}	8,55	10,91	9,75	8,81	9,53	9,10	5,84	6,93	7,17
Δ(dX/dt) _{inf}	6,00	6,66	6,60	4,05	5,76	4,56	3,59	3,78	2,04
X _{m1 <10%}	0,067	0,095	0,097	0,093	0,089	0,098	0,097	0,092	0,099
Δt _{l(X<10%bs)}	175	175	145	325	255	205	425	305	255
ΔX _{m1<10%bs}	12,66	14,36	12,58	12,98	14,74	12,75	13,04	14,89	12,91
ΔdX/dt(X<10%bs)	11,35	14,40	14,62	7,41	9,92	10,15	6,68	8,08	8,14
X _{m f}	0,034	0,038	0,04	0,052	0,033	0,068	0,066	0,022	0,053
Δ t f	295	295	175	415	415	235	475	415	295
Δ X _{m f}	12,69	14,42	12,64	13,02	14,80	12,78	13,07	14,96	12,96
Δ (dX/dt) _f	11,70	14,46	14,70	7,50	9,96	10,13	6,72	8,16	8,27
ΔX _{m1 à f}	0,033	0,057	0,057	0,041	0,056	0,029	0,031	0,070	0,046
Δ(dX/dt) _{1àf}	0,348	0,060	0,084	0,090	0,042	0,018	0,036	0,082	0,132
Δ t f (Δ t t)	300	300	180	420	420	240	480	420	300
Δ X _{m t}	12,69	14,42	12,64	13,02	14,80	12,78	13,07	13,15	12,96
Δ (dX/dt) _t	11,700	14,46	14,700	7,50	10,13	10,78	6,720	8,39	8,274
Δt de la 2 ^{ème} phase	230	230	120	310	330	160	390	340	230
Δt 2 ^{ème} phase/ Δt t%	78,0	78,0	68,6	74,7	79,5	68,1	82,1	81,9	78,0
Δ X _m :X _{minf} à X _{mf}	4,14	3,51	2,89	4,22	5,27	3,68	7,23	8,03	5,79

Tableau n°19 : Valeurs des variations de temps, de teneur en eau résiduelle et de vitesse de séchage des tranches de cardon par épaisseur et par température

ép	5,8 mm			8,8 mm			32 mm		
	60° C	70°C	85° C	60° C	70°C	85° C	60° C	70°C	85° C
t _{mi}	5	5	5	5	5	5	5	5	5
X _{mi}	12,5 1	12,49	13,2 0	13,2 4	12,94	14,2 0	13,1 6	13,46	14,6 0
dX/dt _i	25,3 5	25,65	38,3 5	16,6 5	20,25	26,3 5	17,5 5	13,95	21,5 5
t _{ml inf}	45	55	35	55	65	55	65	75	45
X _{ml inf}	2,99	0,93	1,21	4,55	1,33	1,18 3	3,75	2,875	2,99 5
dX/dt _{inf}	5,28	5,64	7,68	5,40	3,30	5,01	4,2	4,50	11,9 4
Δ t _{inf}	40	50	30	50	60	50	60	70	40
ΔX _{ml inf}	9,52	11,56	11,9 9	8,69	11,61	13,0 1	9,45	11,32	10,1 7
ΔdX/dt _{inf}	20,0 7	20,01	30,6 7	11,2 5	16,95	21,3 4	34,1 5	21,85	5,61
X _{ml <10%}	0,09 9	0,088	0,09 3	0,09 3	0,09	0,1	0,09 9	0,093	0,07 6
Δ t (X<10%bs) _l	145	115	95	275	155	95	295	195	95
Δ X _{ml <10%bs}	12,4 1	12,40	13,1 0	13,1 5	12,85	14,1 0	13,0 6	13,37	14,5 2
Δ dX/dt (X<10%bs)	24,5 7	25,60	38,1 4	16,6 3	20,17	26,2 9	17,4 9	13,87	21,4 6
X _{mf}	0,06 2	0,032	0,02 6	0,07 2	0,048	0,07 5	0,03 1	0,066	0,05
Δ t _f	175	265	225	355	285	235	415	235	225
Δ X _{mf}	12,4 5	12,46	13,1 7	13,1 7	12,89	14,1 2	13,1 3	13,40	14,5 5
Δ dX/dt _f	25,3 5	25,65	38,3 5	16,6 5	20,25	26,3 5	17,5 5	13,95	21,5 5
ΔX _{ml à f}	0,03 7	0,056	0,06 7	0,02 1	0,042	0,02 5	0,06 8	0,027	0,02 6

$\Delta dX/dt$ à l	0,78 0	0,048	0,21 0	0,02 4	0,076	0,06 0	0,06 0	0,084	0,09 0
Δt total	180	270	230	360	290	240	420	240	230
ΔX_m totale	12,4 5	12,46	13,1 7	13,1 7	12,89	14,1 2	13,1 3	13,40	14,5 5
$\Delta dX/dt$ tot	25,2 3	25,35 0	38,3 5	15,1 5	20,25	26,3 5	17,5 5	13,85	21,5 5
Δt de la 2 ^{ème} phase	130	210	190	300	220	180	350	160	180
Δt 2 ^{ème} phase / Δt t%	74,3	79,2	84,4	84,5	77,2	76,6	84,3	68,1	80,0
$\Delta X_m : X_{minf}$ à X_{mf}	2,93	0,90	1,18	4,48	1,28	1,11	3,72	2,81	2,95

Tableau n° 22 : Valeurs des variations de temps, de teneur en eau résiduelle et de vitesse de séchage des rondelles de pomme de terre par épaisseur et par température

ép t°	6,3mm			8,9mm			12,9mm		
	60°C	70°C	85°C	60°C	70°C	85°C	60°C	70°C	85°C
t _{mi}	5	5	5	5	5	5	5	5	5
X _{mi}	3,42	3,15	3,11	3,47	3,17	3,09	3,56	3,51	3,19
dX/dt i	3,258	2,418	2,898	2,658	2,1	3,048	1,58	2,24	1,85
t _{m1 inf}	65	85	85	75	95	55	115	45	85
X _{m1 inf}	1,51	1,24	0,84	1,69	1,53	1,61	1,67	2,48	1,79
dX/dt inf	1,29	0,72	0,90	0,78	0,54	0,96	0,60	1,02	0,48
Δt inf	60	80	80	70	90	50	110	40	80
ΔX_m inf	2,13	1,91	2,27	1,79	1,65	1,49	1,89	1,03	1,40
$\Delta dX/dt$ inf	1,97	1,70	2,00	1,88	1,55	2,09	0,98	1,22	1,37
X _{m1 <10%}	0,099	0,091	0,099	0,1	0,099	0,099	0,1	0,099	0,123
Δt (X<10%bs)l	265	265	215	375	345	285	485	375	535
ΔX_m <10%bs	3,323	3,056	3,008	3,372	3,076	2,995	3,462	3,408	3,071
$\Delta dX/dt$ (X<10%bs)	3,240	2,352	2,886	2,610	1,962	3,036	1,572	2,226	1,824
X _{mf}	0,037	0,066	0,056	0,063	0,04	0,064	0,065	0,055	0,123

$\Delta t f$	385	415	355	475	415	405	595	505	535
$\Delta X_m f$	3,385	3,081	3,051	3,409	3,135	3,031	3,497	3,453	3,071
$\Delta dX/dt f$	3,252	2,418	2,892	2,658	2,034	3,030	1,572	2,232	1,824
$\Delta X_{m1} \text{ à } f$	0,062	0,025	0,044	0,037	0,059	0,036	0,035	0,046	0,000
$\Delta dX/dt1 \text{ à } f$	0,012	0,066	0,006	0,048	0,072	-0,006	0,000	0,006	0,000
$\Delta t \text{ total}$	390	420	360	480	420	410	600	510	540
$\Delta X_m \text{ totale}$	3,39	3,081	3,05	3,41	3,13	3,03	3,50	3,45	3,07
$\Delta dX/dt \text{ tot}$	3,25	2,418	2,89	2,66	2,21	3,03	1,57	2,22	1,82
$\Delta t \text{ de la } 2^{\text{ème}} \text{ phase}$	320	330	270	400	320	350	480	460	450
$\Delta t 2^{\text{ème}} \text{ phase} / \Delta t t\%$	83,1	79,5	76,1	84,2	77,1	86,4	80,7	91,1	84,1
$\Delta X_m : X_{m \text{ inf}} \text{ à } X_{m f}$	1,47	1,17	0,78	1,63	1,49	1,55	1,61	0,43	1,67

Tableau 27 : Valeurs des variations de temps, de teneur en eau résiduelle et de vitesse de séchage des tranches d'ail par épaisseur et par température

ép t°	5,9mm			7,8mm		
	60°C	70°C	85°C	60°C	70°C	85°C
t _{mi}	5	5	5	5	5	5
X _{mi}	1,87	1,85	1,84	1,91	1,86	1,90
dX/dt i	1,83	2,1	2,25	1,35	2,0	1,53
t _{m1 inf}	45	55	45	65	35	65
X _{m1 inf}	0,93	0,72	0,72	1,05	1,13	0,79
dX/dt _{inf}	1,14	0,90	1,20	0,60	1,08	0,84
$\Delta t \text{ inf}$	40	50	40	60	30	60
$\Delta X_m \text{ inf}$	0,95	1,14	1,12	0,86	0,73	1,11
$\Delta dX/dt \text{ inf}$	0,69	1,20	1,05	0,75	0,87	0,69
X _{m1 <10%}	0,096	0,096	0,098	0,097	0,095	0,1
$\Delta t (X < 10\% \text{ bs})$	285	285	285	495	375	325
$\Delta X_m < 10\% \text{ bs}$	1,777	1,754	1,740	1,816	1,768	1,798
$\Delta dX/dt (X < 10\% \text{ bs})$	1,782	2,076	2,226	1,314	1,890	1,464

Xmf	0,043	0,041	0,066	0,068	0,041	0,086
$\Delta t f$	355	475	345	535	445	345
$\Delta X_m f$	1,830	1,809	1,772	1,845	1,821	1,812
$\Delta dX/dt f$	1,788	2,100	2,238	1,338	1,950	1,530
$\Delta X_{m1} \text{ à } f$	0,054	0,055	0,032	0,029	0,053	0,013
$\Delta dX/dt1 \text{ à } f$	0,006	0,024	0,012	0,024	0,060	0,066
$\Delta t \text{ total}$	355	475	345	535	445	345
$\Delta X_m \text{ totale}$	1,830	1,81	1,77	1,85	1,82	1,81
$\Delta dX/dt \text{ tot}$	1,79	2,10	2,24	1,34	1,95	1,53
$\Delta t \text{ inf } 2^{\text{ème}} \text{ phase à } X_f$	310	420	300	470	410	280
$\Delta t \text{ 2ème phase} / \Delta t t\%$	87,3	88,4	87,0	87,9	92,1	81,2
$\Delta X_m : X_{\text{minf}} \text{ à } X_{\text{mf}}$	0,89	0,68	0,65	0,98	1,09	0,70

Tableau n° 31 : Valeurs des variations de temps, de teneur en eau résiduelle et de vitesse de séchage des rondelles d'oignon par épaisseur et par température

ép	6,0mm			8,3mm		
	60°C	70°C	85°C	60°C	70°C	85°C
t ^o	5	5	5	5	5	5
t _{mi}	5	5	5	5	5	5
X _{mi}	8,26	7,36	6,83	9,52	7,46	7,50
dX/dt i	4,29	6,768	8,562	5,634	5,6	5,09
t _{m1 inf}	85	65	45	105	75	65
X _{m1 inf}	3,76	3,05	3,61	4,64	3,66	4,00
dX/dt _{inf}	2,88	3,00	2,88	1,62	1,92	2,40
$\Delta t \text{ inf}$	80	60	40	100	70	60
$\Delta X_m \text{ inf}$	4,50	4,31	3,22	4,89	3,80	3,50
$\Delta dX/dt \text{ inf}$	1,41	3,77	5,68	4,01	3,65	2,69
X _{m1 <10%}	0,083	0,085	0,086	0,096	0,098	0,09
$\Delta t (X < 10\% \text{ bs})_l$	355	245	245	415	325	295
$\Delta X_m < 10\% \text{ bs}$	8,18	7,280	6,748	9,424	7,367	7,414
$\Delta dX/dt (X < 10\% \text{ bs})$	4,158	6,666	8,466	5,586	5,538	4,968
X _{mf}		0,034	0,057	0,04	0,073	0,032
$\Delta t f$	355	295	265	535	385	325

$\Delta X_m f$		7,330	6,777	9,480	7,391	7,472
$\Delta dX/dt f$		6,768	8,496	5,634	5,568	5,088
$\Delta X_{m1} \text{ à } f$		0,051	0,030	0,056	0,024	0,058
$\Delta dX/dt1 \text{ à } f$		0,102	0,030	0,048	0,030	0,120
$\Delta t \text{ total}$	360	300	270	540	390	330
$\Delta X_m \text{ totale}$	8,18	7,330	6,78	9,48	7,39	7,48
$\Delta dX/dt \text{ tot}$	4,16	6,768	8,50	5,63	5,57	4,97
$\Delta t \text{ de la } 2^{\text{ème}} \text{ phase}$	270	230	220	430	310	260
$\Delta t \text{ } 2^{\text{ème}} \text{ phase} / \Delta t t\%$	76,1	78,0	83,0	80,4	80,5	80,0
$\Delta X_m : X_{\text{minf}} \text{ à } X_{\text{mf}}$	3,68	3,02	3,55	4,6	3,59	3,97