



Thèse de Doctorat

Préparée au sein de l'École Doctorale

**Physique Chimie Sciences de la Terre de l'Univers et de l'Ingénieur et le
Laboratoire d'Électrochimie et des Procédés Membranaires**

Spécialité :

Génie des Procédés et Environnement

Présentée par :

Ngoné Fall BEYE

Titre de la thèse :

**Optimisation et Modélisation du Procédé de Séchage
à l'Étuve et en Serre Solaire de Variétés d'Oignon du
Sénégal et Analyse de l'Impact du Procédé sur la
Qualité des Poudres d'Oignon**

Soutenue le 04 décembre 2019

devant le jury composé de

M. Mady CISSÉ	Professeur	École Supérieure Polytechnique de Dakar	Président
M. Soro DOUDJO	Maître de Conférence	Institut National Polytechnique Houphouët Boigny	Rapporteur
M. Michel Bakar DIOP	Maître de Conférence	Université Gaston Berger de Saint-Louis	Rapporteur
M. Abdou SÈNE	Professeur des universités	Université Virtuelle du Sénégal	Examineur
M. Cheikhou KANE	Maître de Conférence	École Supérieure Polytechnique de Dakar	Examineur
Mme. Codou Guèye Mar DIOP	Professeur des universités	École Supérieure Polytechnique de Dakar	Directrice

DÉDICACES

Je remercie Allah, Le Tout Puissant, de m'avoir donné la force et la santé d'aller au bout de ma thèse de Doctorat et prie pour qu'il m'en accorde de nouveau pour relever d'autres défis.

Je dédie ma thèse de Doctorat

À mes parents qui m'ont toujours soutenue et transmise des valeurs. Vous êtes mon école de vie. Ce travail est le fruit de votre investissement sans limite sur tous les plans. Je vous témoigne toute ma reconnaissance et toute mon affection. Puisse Le Tout Puissant dans Sa miséricorde, vous accueillir en Son saint paradis, vous couvrir de Sa grâce et nous aider à garder le cap sur le droit chemin que vous avez tracé pour nous.

À mes frères et sœurs pour leur soutien sans faille, dans les moments les plus difficiles et les moments de doute, vous n'avez jamais abdicé. Qu'Allah vous accorde une santé de fer, une longue vie et veille sur vous sur tous les plans. Puisse Le Tout Puissant préserver cette belle fratrie que nos parents ont su façonner par sa grâce. Que rien ne puisse entacher cet esprit de famille.

À mes neveux et nièces pour leur disponibilité et leur soutien. Qu'Allah guide vos pas et vous aide à préserver les valeurs familiales transmises afin que vous puissiez assurer la relève.

À Pape Talla CISSÉ et Pape Rawane MBAYE, par vos conseils, prières et votre assistance morale, vous avez su soulager, avec l'aide de Dieu, la peine et ce vide immense ressenti suite à l'absence des parents. Que Le Tout Puissant vous accorde une longue vie et vous couvre de Sa grâce.

À Mariama Sène WADE, pour la motivation insufflée dans les moments de doute et ses conseils avisés sur tous les plans. Qu'Allah vous garde.

Que Le Tout Puissant veille sur toutes les personnes qui me sont chères ici-bas et dans l'au-delà.

Amine

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du Centre d'Études sur la Sécurité alimentaire et les Molécules fonctionnelles (CESAM-RESCIF) et du Laboratoire d'Électrochimie et de Procédés Membranaires (LEPM) de l'École Supérieure Polytechnique à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal.

Je témoigne ma profonde reconnaissance et ma gratitude à ma Directrice de Thèse, Professeur Codou Guèye Mar DIOP. Vos conseils, votre disponibilité et votre soutien sur tous les plans m'ont été d'une aide précieuse pour la concrétisation de ce travail. Que le bon dieu vous accorde une santé de fer afin que votre générosité et vos efforts pour notre réussite scientifique soient rétribués.

Je témoigne également ma reconnaissance au Professeur Abdou SENE pour sa disponibilité et son investissement personnel dans la modélisation mathématique qui m'ont permis de mener à bien ce travail. Je vous en remercie du fond du cœur.

J'exprime ma reconnaissance au Professeur Mady CISSE de l'École Supérieure Polytechnique de Dakar, de m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être le président de jury de cette thèse.

J'exprime ma reconnaissance aux Docteurs Soro DOUDJO, Professeur à l'Institut National Polytechnique-Houphouët Boigny et Michel Bakar DIOP, Professeur à l'Université Gaston Berger de Saint-Louis, qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être les rapporteurs de cette thèse.

Je tiens à remercier vivement, le Docteur Cheikhou KANE pour sa compréhension et sa disponibilité. Vos conseils et votre engagement m'ont permis de mener à bien mes travaux de recherches.

Je remercie le Docteur Nicolas AYEISSOU pour sa disponibilité et ses conseils qui m'ont aidé dans la réalisation de mes travaux de recherches.

Mes remerciements à l'ensemble de mes collègues du laboratoire de formation continue pour le soutien mutuel. Votre esprit d'équipe et nos échanges amicaux ont beaucoup contribué à la réalisation de ce travail dans la bonne humeur pendant toutes ses années.

Je remercie également le personnel du CESAM-RESCIF et du LEPM qui ont facilité l'accomplissement de ce travail par leur disponibilité et leur engagement.

TABLE DES MATIERES

DÉDICACES	I
REMERCIEMENTS	II
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	X
NOMENCLATURE	XIII
ABRÉVIATIONS	XV
LISTE DES ANNEXES	XVI
PUBLICATIONS	XVII
COMMUNICATIONS	XVII
RÉSUMÉ	XVIII
ABSTRACT	XIX
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LES OIGNONS ET LE SÉCHAGE	4
<i>I.1 INTRODUCTION</i>	5
<i>I.2 ÉTAT DE L'ART SUR L'OIGNON</i>	5
I.2.1 DESCRIPTION BOTANIQUE ET EXIGENCES ÉCOLOGIQUES DE LA PLANTE.....	5
I.2.2 COMPOSITION, ANALYSE NUTRITIONNELLE ET INTÉRÊT THÉRAPEUTIQUE DE L'OIGNON.....	7
I.2.2.1 COMPOSITION ET ANALYSE NUTRITIONNELLE	7
I.2.2.2 INTÉRÊT THÉRAPEUTIQUE DE L'OIGNON	9
I.2.3 PRODUCTION D'OIGNON DANS LE MONDE	11
I.2.4 LA FILIÈRE DE L'OIGNON AU SÉNÉGAL	14
<i>I.3 ÉTAT DE L'ART SUR LE SÉCHAGE DES PRODUITS ALIMENTAIRES</i>	16
I.3.1 L'EAU DANS LES ALIMENTS	16
I.3.2 IMPORTANCE DU SÉCHAGE DANS LE DOMAINE AGROALIMENTAIRE.....	18
I.3.2.1 PRINCIPE DU SÉCHAGE.....	19
I.3.2.2 QUELQUES DÉFINITIONS.....	22
I.3.2.3 CINÉTIQUE DE SÉCHAGE ET BILANS DE TRANSFERT.....	25
I.3.3 ÉVALUATION DU POTENTIEL DE GISEMENT SOLAIRE DU SÉNÉGAL	29
I.3.3.1 FLUX SOLAIRE	29
I.3.3.2 CARTOGRAPHIE DE L'ENSOLEILLEMENT.....	30
I.3.4 ÉTAT DE L'ART SUR LES SÉCHOIRS SOLAIRES ET LEURS UTILISATIONS	33
I.3.4.1 TYPES DE SÉCHOIRS SOLAIRES.....	33
I.3.4.2 CRITÈRES DÉTERMINANTS POUR LE CHOIX ET L'UTILISATION DES SÉCHOIRS SOLAIRES.....	39
<i>I.4 CONCLUSION</i>	43

CHAPITRE II APPLICATION DU SÉCHAGE AUX QUATRE VARIÉTÉS D'OIGNON 45

II.1	INTRODUCTION.....	46
II.2	PRÉSENTATION DU MATÉRIEL VÉGÉTAL.....	47
II.2.1	ORIGINE ET CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL VÉGÉTAL.....	47
II.2.2	PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS.....	48
II.2.3	DIAGRAMME DE PRODUCTION DE LA POUDRE D'OIGNON.....	49
II.3	CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUES ET BIOCHIMIQUES DES QUATRE VARIÉTÉS D'OIGNON.....	50
II.3.1	MATÉRIELS D'ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES ET BIOCHIMIQUES.....	50
II.3.1.1	RÉACTIFS.....	50
II.3.1.2	APPAREILLAGES.....	50
II.3.2	MÉTHODES D'ANALYSES.....	51
II.3.2.1	DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN EAU.....	51
II.3.2.2	DÉTERMINATION DE L'ACTIVITE DE L'EAU.....	52
II.3.2.3	DOSAGE DES PROTÉINES.....	52
II.3.2.4	DÉTERMINATION DES MATIÈRES MINÉRALES.....	53
II.3.2.5	DOSAGE DES MINÉRAUX.....	54
II.3.2.6	DOSAGE DES SUCRES TOTAUX ET SUCRES RÉDUCTEURS.....	55
II.3.2.7	DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN POLYPHÉNOLS.....	56
II.3.2.8	DÉTERMINATION DU POTENTIEL HYDROGÈNE (PH).....	57
II.3.2.9	DÉTERMINATION DE L'ACIDITÉ TITRABLE.....	58
II.3.3	RÉSULTATS.....	59
II.3.3.1	CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUES.....	59
II.3.3.2	CARACTÉRISATION BIOCHIMIQUES.....	60
II.3.4	DISCUSSION.....	61
II.4	EFFET DE LA VARIÉTÉ ET DE LA TEMPÉRATURE SUR LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE.....	63
II.4.1	MATÉRIELS.....	64
II.4.1.1	MATÉRIELS VÉGÉTAL.....	64
II.4.1.2	MATÉRIEL DE SÉCHAGE ET D'ANALYSE.....	64
II.4.1.3	OUTILS GRAPHIQUES ET D'ANALYSES STATISTIQUE.....	64
II.4.2	MÉTHODES.....	64
II.4.2.1	PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL.....	64
II.4.2.2	CINÉTIQUES DE SÉCHAGE.....	65
II.4.2.3	DÉTERMINATION DES COEFFICIENTS DE DIFFUSIVITÉ EFFECTIVE.....	65
II.4.2.4	DÉTERMINATION DE L'ÉNERGIE D'ACTIVATION.....	66
II.4.3	RÉSULTATS.....	66
II.4.3.1	CINÉTIQUE DE SÉCHAGE.....	67
II.4.3.2	DÉTERMINATION DES COEFFICIENTS DE DIFFUSIVITÉ EFFECTIVE.....	69
II.4.3.3	DÉTERMINATION DE L'ÉNERGIE D'ACTIVATION EN FONCTION DES PÉRIODES DE RÉCOLTE.....	71
II.4.3.4	TEST STATISTIQUE SUR LES COEFFICIENTS DE DIFFUSIVITÉ EFFECTIVE ET LES ÉNERGIES D'ACTIVATION.....	73
II.4.4	DISCUSSION.....	74
II.5	COMPARAISON DU SÉCHAGE A L'ÉTUVE AU SÉCHAGE EN SERRE SOLAIRE.....	77
II.5.1	MATÉRIELS.....	77
II.5.1.1	MATÉRIEL VÉGÉTAL.....	77

II.5.1.2	MATÉRIELS DE SÉCHAGE ET D'ANALYSE.....	77
II.5.1.3	OUTILS GRAPHIQUES ET D'ANALYSES STATISTIQUES.....	78
II.5.2	MÉTHODES.....	78
II.5.2.1	CARACTÉRISTIQUES MAJEURES DES VARIÉTÉS D'OIGNON.....	78
II.5.2.2	ÉTABLISSEMENT DES CINÉTIQUES DE SECHAGE	78
II.5.2.3	ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES.....	80
II.5.2.4	ANALYSES STATISTIQUES	80
II.5.3	RÉSULTATS.....	81
II.5.3.1	CARACTÉRISTIQUES MAJEURES DES ÉCHANTILLONS D'OIGNON AVANT SÉCHAGE	81
II.5.3.2	CONDITIONS OPTIMALES DE SÉCHAGE	81
II.5.3.3	CHOIX DE LA PLAGE IDÉALE DE SÉCHAGE.....	85
II.5.4	DISCUSSION.....	90
<i>II.6</i>	<i>MODÉLISATION DE LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE A L'ÉTUVE ET EN SERRE SOLAIRE</i>	<i>92</i>
II.6.1	MATÉRIELS.....	93
II.6.1.1	MATÉRIEL VÉGÉTAL	93
II.6.1.2	MATÉRIEL DE SÉCHAGE ET D'ANALYSE	93
II.6.1.3	OUTILS D'ANALYSES STATISTIQUES ET DE MODÉLISATION	93
II.6.2	MÉTHODES.....	94
II.6.2.1	ÉTUDE DES CINÉTIQUES DE SÉCHAGE A L'ÉTUVE ET EN SERRE SOLAIRE	94
II.6.2.2	MODÉLISATION DES CINÉTIQUES DE SÉCHAGE	94
II.6.2.3	COURBES CARACTÉRISTIQUES DE SÉCHAGE.....	95
II.6.3	RÉSULTATS.....	96
II.6.3.1	ÉVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU RÉDUITE DES QUATRE VARIÉTÉS D'OIGNON SÉCHÉS À L'ÉTUVE ET EN SERRE SOLAIRE.....	96
II.6.3.2	MODÉLISATION DE LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE A L'ÉTUVE.....	98
II.6.3.3	DÉTERMINATION DES COURBES CARACTÉRISTIQUES DE SÉCHAGE	104
II.6.3.4	MODÉLISATION DE LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE EN SERRE SOLAIRE.....	107
II.6.4	DISCUSSION.....	110
<i>II.7</i>	<i>DÉTERMINATION DES ISOTHERMES DE DÉSORPTION ET COMPARAISON ÉCONOMIQUE DES MODES DE SÉCHAGE À L'ÉTUVE ET EN SERRE SOLAIRE.....</i>	<i>113</i>
II.7.1	MATÉRIELS.....	114
II.7.1.1	MATÉRIEL VÉGÉTAL	114
II.7.1.2	MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL ET D'ANALYSE	114
II.7.2	MÉTHODOLOGIE.....	114
II.7.2.1	DÉTERMINATION DES ISOTHERMES DE DÉSORPTION.....	114
II.7.2.2	MODÉLISATION DES ISOTHERMES DE DÉSORPTION	115
II.7.2.3	PROPRIÉTÉS THERMODYNAMIQUES.....	116
II.7.2.4	COMPARAISON ÉCONOMIQUE DES MODES DE SÉCHAGE À L'ÉTUVE ET EN SERRE SOLAIRE.....	118
II.7.3	RÉSULTATS.....	120
II.7.3.1	DÉTERMINATION DES ISOTHERMES DE DÉSORPTION.....	120
II.7.3.2	MODÉLISATION DES ISOTHERMES DE DÉSORPTION	121
II.7.3.3	PROPRIÉTÉS THERMODYNAMIQUES.....	123
II.7.3.4	COMPARAISON ÉCONOMIQUE DES DEUX MODES DE SÉCHAGE	127
II.7.4	DISCUSSION.....	130

<i>II.8</i>	<i>IMPACT DU SÉCHAGE SUR LES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES ET BIOCHIMIQUES DES POUDRES D'OIGNON</i>	<i>134</i>
II.8.1	MATÉRIELS	134
II.8.1.1	MATÉRIEL VÉGÉTAL	134
II.8.1.2	MATÉRIEL D'ANALYSE	134
II.8.2	MÉTHODES.....	134
II.8.3	RÉSULTATS	135
II.8.3.1	CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUES.....	135
II.8.3.2	CARACTÉRISATION BIOCHIMIQUE	138
II.8.4	DISCUSSION.....	142
<i>II.9</i>	<i>CONCLUSION</i>	<i>143</i>
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	145
	PERSPECTIVES	148
	REFERENCES	I
	ANNEXES	XIV

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Synthèse des composés volatils responsables du goût et du larmolement lors de l'épluchage et du découpage de l'oignon.....	7
Figure 2 : Répartition de la production mondiale d'oignon par région.....	11
Figure 3 : Évolution de la production d'oignon en Afrique de l'ouest.....	13
Figure 4 : Évolution des importations d'oignons versus celle de la production au Sénégal.	14
Figure 5 : Modification des aliments en fonction de l'activité de l'eau.	17
Figure 6 : Principe du séchage par entraînement avec de l'air chaud.....	22
Figure 7 : Exemple d'isotherme de sorption.	24
Figure 8 : Courbes théoriques du séchage par entraînement.....	25
Figure 9 : Les différents flux de chaleur et de matière lors du séchage par convection d'air....	26
Figure 10 : Flux solaire moyen annuel au Sénégal.....	30
Figure 11 : Nombre d'heures d'ensoleillement par localités au Sénégal.....	31
Figure 12 : Évolution de l'insolation des principales régions situées dans les grandes zones de production d'oignon.....	32
Figure 13 : Évolution du flux solaire des principales régions situées dans les grandes zones de production d'oignon.....	32
Figure 14 : Exemple de capteur solaire plan. Source : [65].....	34
Figure 15 : Mode de circulation de l'air par convection naturelle (a) et par convection forcée (b) dans les séchoirs solaires. Source : [81].	34
Figure 16 : Plantation d'oignons à Rao.....	47
Figure 17 : Récolte d'oignons dans une plantation à Rao.....	47
Figure 18 : Les différentes étapes de la production de poudre d'oignon par séchage à l'étuve et en serre solaire.....	49
Figure 19 : Évolution en fonction du temps de séchage de la teneur en eau réduite des variétés récoltées avec un degré de maturité ≤ 80 %. (moyenne des résultats expérimentaux mars 2015 et 2016).	67
Figure 20 : Évolution en fonction du temps de séchage de la teneur en eau réduite des variétés d'oignon récoltées à un degré de maturité supérieure à 85 %.....	68
Figure 21 : Évolution en fonction du temps du logarithme Népérien de la teneur en eau (dans la phase isenthalpique de séchage des variétés à un degré de maturité ≤ 80 %).	69
Figure 22 : Évolution en fonction du temps du logarithme Népérien de la teneur en eau (dans la phase isenthalpique de séchage des variétés à un degré de maturité ≥ 85 %).	70

Figure 23 : Évolution de la moyenne des coefficients de diffusivité effective des variétés aux différentes températures de séchage (mars pour le degré de maturité 80 % et juin pour 85 %).	72
Figure 24 : (a) Photo de l'étuve (b) les coupelles pour le suivi de la cinétique (c) les plateaux pour la production des échantillons de poudres d'oignon.	79
Figure 25 : (a),Photo de la serre solaire vue de l'extérieur avec le système de ventilation et d'extraction de l'air et (b), photo d'une claie de séchage avec les oignons répartis en fine couche.	80
Figure 26 : Évolution de la teneur en eau des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 séchées à l'étuve aux différentes températures.....	82
Figure 27 : Évolution de la teneur en eau des quatre variétés d'oignon séchées en serre solaire à des températures variables au cours du séchage	84
Figure 28 : Activité de l'eau des échantillons après séchage aux conditions optimales à l'étuve	85
Figure 29 : Acidité titrable et pH des échantillons après séchage à l'étuve à différentes températures.	86
Figure 30 : Teneur en polyphénols après séchage à l'étuve à différentes températures.....	86
Figure 31 : Poudres d'oignon obtenues après séchage de la variété Violet de Galmi à l'étuve [(a) 60 °C, (b) 65 °C et (c) 70 °C] et en serre solaire [(d) 8h, (e) 9h et (f) 10h].....	89
Figure 32 : Évolution de la teneur en eau des variétés d'oignon séchées à l'étuve.....	96
Figure 33 : Évolution de la teneur en eau des variétés d'oignon séchés en serre solaire.	97
Figure 34 : Évolution de la teneur en eau réduite (prédite par le meilleur modèle et expérimentale) en fonction du temps de séchage des variétés Violet de Galmi et Safari.	102
Figure 35 : Évolution de la teneur en eau réduite (prédite par le meilleur modèle et expérimentale) en fonction du temps de séchage des variétés Gandiol F1 et Orient F1.....	103
Figure 36 : Courbes caractéristiques de séchage des variétés d'oignon Violet de Galmi et Safari.	105
Figure 37 : Courbes caractéristiques de séchage des variétés d'oignon Gandiol F1 et Orient F1.	106
Figure 38 : Évolution en fonction de la température des paramètres du meilleur modèle Verma et al. pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiolais et Orient F1.	108
Figure 39 : Évolution au cours du séchage en serre solaire de la teneur en eau réduite expérimentale et prédite par le modèle Verma et al. température dépendante.	110
Figure 40 : Isotherme de désorption des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 aux températures 50,55,60 et 65 °C.....	120

Figure 41 : Isotherme de désorption expérimental et prédit avec le meilleur modèle Henderson.	122
Figure 42 : Évolution du Logarithme Népérien de l'activité de l'eau en fonction de l'inverse de la température pour des teneurs en eau d'équilibre de 5, 15, 25, 35 et 40 %.	124
Figure 43 : Évolution de la chaleur nette isotérique de désorption en fonction de la teneur en eau d'équilibre pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.	125
Figure 44 : Évolution de la chaleur nette isotérique de désorption en fonction de l'entropie.	126
Figure 45 : Caractéristiques physico-chimiques (humidité, activité de l'eau, pH, acidité titrable et cendre) des poudres d'oignons Violet de Galmi et Safari obtenues dans les conditions optimales de séchage à l'étuve et en serre solaire.	135
Figure 46 : Caractéristiques physico-chimiques (humidité, activité de l'eau, pH, acidité titrable et cendre) des poudres d'oignons Gandiol F1 et Orient F1 obtenues dans les conditions optimales de séchage à l'étuve et en serre solaire.	136
Figure 47 : Teneur en protéines, Sucres Totaux (ST) et Sucres Réducteurs (SR) des poudres d'oignons Violet de Galmi et Safari obtenues dans les conditions optimales de séchage à l'étuve et en serre solaire. (Galmi S et Safari S correspondent au séchage en serre).	138
Figure 48 : Teneur en protéines, Sucres Totaux (ST) et Sucres Réducteurs (SR) des poudres d'oignons Gandiol F1 et Orient F1 obtenues dans les conditions optimales de séchage à l'étuve et en serre solaire. (Gandiol F1 S et Orient F1 S correspondent au séchage en serre).	139
Figure 49 : Teneur en polyphénols et en minéraux (sodium, potassium, magnésium et calcium) des poudres d'oignons Violet de Galmi et Safari obtenues dans les conditions optimales de séchage à l'étuve et en serre solaire.	140
Figure 50 : Teneur en polyphénols et en minéraux (sodium, potassium, magnésium et calcium) des poudres d'oignons Gandiol F1 et Orient F1 obtenues dans les conditions optimales de séchage à l'étuve et en serre solaire.	141

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Cycle de développement de l'oignon [22].	6
Tableau II : Teneur de quelques constituants majoritaires dans l'oignon cru (base humide).	8
Tableau III : Valeurs limites de l'activité de l'eau favorables au développement des microorganismes dans certains produits.	17
Tableau IV : Avantages et inconvénients des différents types de séchoirs solaires.	37
Tableau V : Travaux montrant une influence de la température et de l'humidité relative de l'air sur la cinétique de séchage de quelques produits végétaux.	40
Tableau VI : Travaux montrant une faible influence de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage de quelques produits végétaux.	40
Tableau VII : Travaux montrant une influence de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage de quelques produits végétaux.	41
Tableau VIII : Caractéristiques des bulbes des quatre variétés d'oignon.	48
Tableau IX : Teneur en eau, activité de l'eau, acidité titrable, pH et taux de cendre des variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 avant séchage.	59
Tableau X : Teneur en protéines, en sucres totaux et en sucres réducteurs des variétés Violets de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.	60
Tableau XI : Teneur en polyphénols et en minéraux (sodium, potassium, magnésium et calcium) des variétés Violets de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.	61
Tableau XII : Épaisseurs des échantillons des différentes variétés d'oignon caractérisées.	66
Tableau XIII : Valeurs moyennes des coefficients de diffusivité effective en fonction du degré de maturité et de la température de séchage des quatre variétés d'oignon.	71
Tableau XIV : Équations des coefficients de diffusivité effective moyenne et coefficients de corrélation selon la période de récolte.	72
Tableau XV : Énergie d'activation moyenne des variétés d'oignon en fonction de la période de récolte.	73
Tableau XVI : Paramètres du test t de Welch pour la comparaison des moyennes (mars versus juin) de coefficients de diffusivité effective et de l'énergie d'activation au sein de chaque variété.	74
Tableau XVII : Paramètre du test de Turkey pour la comparaison des moyennes de coefficients de diffusivité effective et de l'énergie d'activation entre les variétés.	74
Tableau XVIII : Caractéristiques majeures des échantillons d'oignon avant séchage.	81
Tableau XIX : Temps de séchage à la serre et teneur en eau des échantillons séchés.	84

Tableau XX : Activité de l'eau des échantillons séchés en serre solaire aux différents temps de séchage permettant d'atteindre les valeurs d'humidité de stabilité.....	87
Tableau XXI : pH, acidité titrable et teneur en polyphénols des échantillons séchés en serre solaire dans les conditions optimales (T °C 35-65 °C, HR 10-60 %, temps 8-9h).....	88
Tableau XXII : Équations des modèles mathématiques appliqués à la modélisation de la cinétique de séchage des variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.....	95
Tableau XXIII : Critères statistiques de choix du meilleur modèle pour la variété Violet de Galmi.	98
Tableau XXIV : Critères statistiques de choix du meilleur modèle pour la variété Safari.	99
Tableau XXV : Critères statistiques de choix du meilleur modèle pour la variété Gandiol F1.	100
Tableau XXVI : Critères statistiques de choix du meilleur modèle pour la variété Orient F1.	101
Tableau XXVII : Équations des courbes caractéristiques de séchage des variétés Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.	107
Tableau XXVIII : Equation des paramètres du meilleur modèle Verma et al. en fonction de la température.....	109
Tableau XXIX : Activité de l'eau à différentes températures des sels utilisés pour la détermination des isothermes de désorption des quatre variétés d'oignon.....	115
Tableau XXX : Récapitulatif des équations des modèles empiriques appliqués à la modélisation.	116
Tableau XXXI : Caractéristiques de l'étuve et de la serre solaire.	118
Tableau XXXII : Paramètres statistiques déterminés avec les différents modèles testés pour la modélisation des isothermes de désorption des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.	121
Tableau XXXIII : Paramètres du modèle Henderson pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.	123
Tableau XXXIV : Chaleur nette isotérique de désorption des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 pour des teneurs en eau d'équilibre de 5, 15, 25, 35 et 40 %.	124
Tableau XXXV : Chaleur isotérique de désorption des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 pour des teneurs en eau d'équilibre de 5, 15, 25, 35 et 40 %.....	126
Tableau XXXVI : Énergie libre à la température isocinétique de désorption des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 pour des teneurs en eau d'équilibre de 5, 15, 25, 35 et 40 %.....	127

Tableau XXXVII : Tableau récapitulatif des capacité en produit humide, débit évaporatoire, énergie nécessaire et disponible pour le séchage en serre solaire à température variable entre 35°C et 65 °C.	128
Tableau XXXVIII : Tableau récapitulatif des capacité en produit humide, débit évaporatoire, énergie nécessaire et disponible pour le séchage à l'étuve dans la plage idéale de température de 55 °C à 65 °C.....	129

NOMENCLATURE

Symbole	Nomenclature	Unité
A_w	Activité de l'eau	KJ
C_{m0}	Capacité en oignon à l'état frais	$Kg/h\ m^2$
$C_{m0, e}$	Capacité en oignon à l'état frais à l'étuve	$Kg/h\ m^2$
$C_{m0, s}$	Capacité en oignon à l'état frais en serre solaire	$Kg/h\ m^2$
D_0	Paramètre d'Arrhénius	
D_{eff}	Coefficient de diffusivité effective	$m^2\ s^{-1}$
$D_{évap}$	Débit évaporatoire	$Kg/h\ m^2$
$D_{évap\ e}$	Débit évaporatoire à l'étuve	$Kg/h\ m^2$
$D_{évap\ s}$	Débit évaporatoire en serre solaire	$Kg/h\ m^2$
E_a	Énergie d'activation	$J\ mol^{-1}$
e	Épaisseur des morceaux d'oignon	m
L_{vap}	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	$84\ KJ\ mol^{-1}$
m_0	Masse d'oignon à l'état frais	$g\ ou\ Kg$
$m_{0, d}$	Masse d'oignon à l'état frais ayant subi une dessiccation à 105°C	$Kg\ ou\ g$
$m_{e\ évap}$	Masse d'eau évaporée	Kg
m_h	Masse humide d'oignon à l'équilibre thermodynamique avec les solutions salines saturées	Kg
$m_{h, d}$	Masse sèche d'oignon à l'équilibre thermodynamique et ayant subi une dessiccation à 105°C	Kg
m_t	Masse d'oignon séché au bout d'un temps t	$Kg\ ou\ g$
$m_{t, d}$	Masse d'oignon séché au bout d'un temps t et ayant subi une dessiccation à 105°C	$Kg\ ou\ g$
N	Nombre de paramètres de chaque modèle	
n	Nombre d'isotherme de désorption	
n_{exp}	Nombre de données expérimentales	
N_{juti}	Nombre de jours d'utilisation de la serre solaire par an	j/an
$Q_{disp\ e}$	Énergie disponible à l'étuve	KJ
$Q_{disp\ s}$	Énergie disponible en serre solaire	KJ
$Q_{n\ st}$	Chaleur nette isotérique de désorption	$KJ\ mol^{-1}$

$Q_{n\ st\ c\ e}$	Chaleur nette isotérique de désorption pour le cycle de séchage à l'étuve	KJ
$Q_{n\ st\ c\ s}$	Chaleur nette isotérique de désorption pour le cycle de séchage en serre solaire	KJ
Q_{st}	Chaleur isotérique de désorption	$KJ\ mol^{-1}$
$Q_{st\ c\ e}$	Chaleur isotérique de désorption pour le cycle de séchage à l'étuve	KJ
$Q_{st\ c\ s}$	Chaleur isotérique de désorption pour le cycle de séchage en serre solaire	KJ
R	Constante des gaz parfaits	$J\ mol^{-1}\ K^{-1}$
R^2	Coefficient de détermination ou corrélation	
S	Surface du plateau ou de la claie	m^2
T	Température de désorption	$^{\circ}C$
T_{harm}	Température harmonique	$^{\circ}K$
T_{iso}	Température isocinétique	$^{\circ}K$
X_0	Teneur en eau initiale	$\% (w/w)$
X_{eq}	Teneur en eau d'équilibre	$Kg\ H_2O\ Kg^{-1}\ ms$
$X_{exp, t}$	Teneur en eau aux différents temps de séchage	$\% (w/w)\ base\ humide$ <i>ou ms</i>
$X_{r\ exp, t}$	Teneur en réduite expérimentale aux différents temps de séchage	
$X_{r\ pred}$	Teneur en réduite prédite	
ΔS	Entropie de désorption	$KJ\ mol^{-1}\ K^{-1}$
Δt	Durée du cycle de séchage	h
ΔG	Énergie libre	KJ / mol
β	Coefficient de transfert	$m\ s^{-1}$
χ^2	Paramètre statistique Chi-deux	

ABRÉVIATIONS

ANACIM	Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie
AT	Acidité Titrable
bh	Base humide
CCS	Courbes Caractéristiques de Séchage
IAA	Industrie Agro-Alimentaire
ms	Base matière sèche
ONG	Organisme Non Gouvernementale
PRACAS	Programme de Relance et d'Accélération de la Cadence de l'Agriculture au Sénégal
SA	Sécurité Alimentaire
SENELEC	Société nationale d'Électricité du Sénégal
SR	Sucres Réducteurs
ST	Sucres Totaux
UNICEF	United Nations International Children's Emergency Fund
VNR	Valeurs Nutritionnelles de Référence
VFS	Vallée du Fleuve Sénégal

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Valeurs Nutritionnelles de Référence recommandées par le règlement européen 1169/2011.....	XIV
Annexe B : Production d'oignon en tonnes par continent.....	XV
Annexe C : Production d'oignon en tonnes dans le continent Africain.....	XVI
Annexe D : Diagramme de l'air humide.....	XVII
Annexe E : Données Climatologiques.....	XVIII
Annexe F : Calendrier de disponibilité des fruits et légumes au Sénégal.....	XXII
Annexe G : Exemples de cinétiques de séchage montrant l'influence de certains paramètres.	XXIII
Annexe H : Tableau des réactifs utilisés.....	XXVI
Annexe I : Extrait table des valeurs pour 25 mL de réactif selon Luff-Schoorl.....	XXVII
Annexe J : Compositions de l'oignon en poudre et en flocons déshydratés Extraites de la table de composition des aliments.....	XXVIII
Annexe K : Quelques exemples de chromatogrammes du profil minéraux des variétés d'oignon à l'état frais et séchées à l'étuve et en serre solaire.....	XXIX

PUBLICATIONS

- ❖ Beye, N.F., Ayessou, N., Diop, M., Saliou, N., and Mar, C.G. (2019a). Determinants of Onion Self-Sufficiency in Senegal: Situational Analysis of the Subsector. *Int. J. Adv. Res.* 7(6), 560–572. <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/9255>
- ❖ Beye, N.F., Ayessou, N., Kane, C., Mbaye, M., Talla, C., Sène, A., and Diop, C. (2019b). Study of Four Onion Varieties Drying Kinetics in an Oven and a Solar Greenhouse. *J. Food Res.* 8, p59. <https://doi.org/10.5539/jfr.v8n3p59>
- ❖ Beye, N.F., Kane, C., Ayessou, N.C., Talla, C., Sène, A., and Diop, C.M. (2018). Influence of Variety and Maturity Level on Natural Convective Heat Drying of Four Onion Varieties Grown in Senegal. *Food Nutr. Sci.* 09, 997. <http://doi.org/10.4236/fns.2018.98073>
- ❖ Beye, N. F., Kane, C., Ayessou, N., Kebe, C. M. F., Talla, C., Diop, C. M., & Sène, A. (2019c). Modelling the dehydration kinetics of four onion varieties in an oven and a solar greenhouse. Elsevier. *Heliyon*, 5(9), e02430. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02430>

COMMUNICATIONS

- ❖ École Doctorale Physique, Chimie, Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'ingénieur (ED _ PCSTUI). Mars 2017.
« Optimisation / Modélisation du Procédé de Déshydratation de Variétés d'Oignon Local et Étude de son Impact sur la Qualité des Produits ».
1^{er} prix meilleure communication.
- ❖ Ma Thèse en 180s (MT180s). Juillet 2017.
« Conservation de l'Oignon par Déshydratation en Serre Solaire : Enjeux Sociétaux ».
3^{ème} prix du Jury.
- ❖ Société Ouest Africaine de Chimie (S.O.A.CHIM) - 18^{èmes} Journées Scientifiques Annuelles Groupe Thématique Sciences Agroalimentaires (ReSAOA). Août 2017.
« Valorisation des Produits Agricoles au Sénégal : Étude de la Transformation de Variétés d'Oignon Local par procédé de Déshydratation à l'Étuve *versus* Serre Solaire ».
1^{er} prix de la meilleure communication du Programme d'Appui Stratégique à la Recherche Scientifique, (PASRES – Côte d'Ivoire).

RÉSUMÉ

Les importantes pertes post-récolte (5% à 40% selon la durée de stockage) liées à la forte teneur en eau des variétés d'oignon du Sénégal, sont à l'origine des difficultés d'accès à l'oignon local toute saison. En effet, l'humidité des bulbes d'oignon des variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 à l'état frais varient entre $85,56 \pm 0,60$ et $89,13 \pm 0,69$ (% base humide). Ce travail concerne l'optimisation et la modélisation du procédé de séchage de ces quatre variétés d'oignon à l'étuve et en serre solaire et l'analyse de l'impact du procédé sur la qualité des poudres d'oignon afin de pallier la périssabilité tout en préservant l'environnement.

La caractérisation de la cinétique de séchage à l'étuve et l'étude des isothermes de désorption montrent un effet de la variété, du degré de maturité et de la température de séchage avec une différence significative (valeurs de p inférieures à $2,20 \cdot 10^{-16}$ pour l'effet de la température et le degré de maturité, égales à $1,08 \cdot 10^{-12}$ pour l'effet de la variété). Toutefois, les vitesses de séchage réduites et les valeurs de chaleur nette isotérique de désorption sont décrites toutes deux par des polynômes de degré 3.

Pour obtenir une humidité $\leq 8,89 \pm 0,16$ (%) assurant la stabilité, les conditions optimales de séchage à l'étuve sont de $60 \text{ °C} / 6\text{h}$ (Violet de Galmi) et 7h (Safari, Gandiol F1 et Orient F1). Le séchage solaire optimal en serre est obtenu pour des conditions de séchage de 35 à $65 \text{ °C} / 8\text{h}-9\text{h}$. L'absence de différence significative (p -value $> 5 \%$ pour le test de Student) entre la cinétique de séchage à l'étuve et celle en serre solaire pour les quatre variétés, permet, à partir du meilleur modèle Verma *et al.* établi pour la cinétique de séchage à l'étuve, d'établir un modèle température dépendante pour la cinétique de séchage à température variable en serre solaire.

Quant à la modélisation des isothermes de désorption dans la plage idéale de températures de séchage entre 55 °C et 65 °C , le modèle Henderson permet d'obtenir une meilleure dispersion et une meilleure adéquation pour les quatre variétés (des valeurs de R^2 comprises entre $0,97$ et $0,99$ et des valeurs de χ^2 comprises entre $0,0016$ et $0,029$).

Dans ces conditions optimales de séchage aussi bien à l'étuve qu'en serre solaire, la teneur en polyphénols (constituant d'intérêt thérapeutique majeur dans l'oignon) en g Équivalent d'Acide Gallique / 100 g ms augmente ($0,111 \pm 0,0040$ à $0,312 \pm 0,0041$ avant séchage ; $0,546 \text{ g} \pm 0,0117$ à $0,837 \pm 0,0091$ après séchage à l'étuve et $0,530 \pm 0,003$ à $0,720 \pm 0,003$ après séchage en serre solaire). Par ailleurs, la variété Violet de Galmi est la variété limitante et le séchage en serre solaire permet de réduire les coûts sans altérer les caractéristiques biochimiques.

Mots clefs : *Allium cepa* L., Cinétiques de séchage, Conditions optimales, Humidité de stabilité, Activité de l'eau, Modélisation, Isothermes de désorption, Courbes caractéristiques de séchage, Polyphénols.

ABSTRACT

The high post-harvest losses (between 5% to 40% depending on the storage period) due to the high moisture content of Senegalese onion varieties, are the main causes of the difficulties in accessing the local onion all year round. In fact, the moisture content of onion bulbs of the Galmi Violet, Safari, Gandiol F1 and Orient F1 varieties varies between 85.56 ± 0.60 and 89.13 ± 0.69 (% wet basis).

This work is about the Optimization and Modeling of the drying process of these four onion varieties in the oven and in the solar greenhouse and the impact analysis of the process on the quality of onion powders in order to mitigate perishability while preserving the environment.

The characterization of the drying kinetics in the oven and the study of desorption isotherms show an effect of the variety, the degree of maturity and the drying temperature with a significant difference (p-values under $2.20 \cdot 10^{-16}$ for the effect of the maturity degree and the drying temperature, and equal to $1.08 \cdot 10^{-12}$ for the effect of the variety). However, the reduced drying rates and the net isotheric heat values of desorption, are both described with degree 3 polynomials. To get a humidity of 8.89 ± 0.16 (%) ensuring stability, the optimal drying conditions in the oven are $60^{\circ}\text{C} / 6\text{h}$ (Galmi violet) and 7h (Safari, Gandiol F1 and Orient F1). Optimal solar drying in the greenhouse is reached at temperatures from 35°C to 65°C and drying time between 8h and 9h. The absence of any significant difference (p-value $> 5\%$ for the Student test) between the drying kinetics in the oven and in the solar greenhouse for the four onion varieties, allows to use the best Verma *et al.* model set for the oven drying kinetics to set up a dependent temperature model for the variable temperature drying kinetics in the solar greenhouse.

As for the modeling of desorption isotherms in the ideal drying temperature range between 55°C to 65°C , the Henderson model provides better dispersion and suitability for the four varieties (R^2 values between 0.97 and 0.99 and χ^2 values between 0.0016 and 0.029).

Under these optimal drying conditions both in the oven and in the solar greenhouse, the content in polyphenols (a component of major therapeutic interest in onions) in g Gallic acid equivalent / 100 g ms increases (0.111 ± 0.0040 to 0.312 ± 0.0041 before drying; $0.546 \text{ g} \pm 0.0117$ to 0.837 ± 0.0091 after drying in the oven and 0.530 ± 0.003 to 0.720 ± 0.003 after drying in the solar greenhouse). In addition, the Galmi Violet variety is the limiting variety and drying in the solar greenhouse reduces costs without altering biochemical characteristics.

Keywords: *Allium cepa* L., Drying kinetics, Optimal conditions, Stability moisture, Water activity, Modelling, Desorption isotherm, Drying characteristic curves, Polyphenols.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En Afrique sub-saharienne, de 1990-1992 et 2014-2016, le nombre de personnes sous-alimentées est passé de 176 (17,4 %) à 220 million (27,7 %) [1]. D'après l'enquête de l'United Nations International Children's Emergency Fund (UNICEF) réalisée en décembre 2011 plus d'un million d'enfants de moins de cinq ans souffrent de malnutrition sévère dans la région du Sahel particulièrement au nord du Sénégal, au Mali et au Burkina Faso [2]. Cette malnutrition est engendrée par la déstabilisation de l'équilibre de facteurs déterminants qui sont d'ordre économique, social et environnemental [3], [4].

Face à cette mauvaise disponibilité et cette difficulté d'accès aux denrées alimentaires de bonne qualité nutritionnelle et sanitaire, fortement liées à un manque de moyens financiers, à des pluies irrégulières, ainsi qu'à une fluctuation des importations, il est essentiel de trouver des alternatives afin d'assurer la Sécurité Alimentaire (SA) et de pallier les problèmes de santé publique touchant toutes les couches de la population sénégalaise.

Toutefois, afin que les actions de lutte contre cette vulnérabilité soient pérennes, la SA, doit être garantie dans le cadre d'une politique de développement durable à savoir :

- ❖ que les ressources naturelles doivent être assimilées à une forme de capital qu'il s'agit de faire fructifier et dont le seul but est d'augmenter la productivité ;
- ❖ que l'investissement économique des pays pauvres est une urgence, mais ne doit pas avoir d'impacts environnementaux et sociaux. Toute nouvelle activité doit être économiquement rentable à court terme mais aussi à long terme ;
- ❖ qu'un système de commerce équitable proposant de meilleures conditions commerciales aux producteurs marginalisés spécialement dans le Sud et sécurisant leurs droits doit être mis en place ;
- ❖ que l'autonomie alimentaire doit rapidement être mise en place car la survie de la population des pays en voie de développement dépend directement de l'agriculture. L'augmentation de la production alimentaire doit se dérouler sans incidences négatives pour l'environnement [5]–[8].

Par conséquent, l'un des défis majeurs de la lutte contre la vulnérabilité et du développement durable, est de « Nourrir les populations actuelles en évitant le gaspillage des ressources pour les générations futures ».

Cet objectif du développement durable est cependant loin d'être atteint avec 45 % de pertes tout au long de la chaîne de valeur des fruits et légumes produits dans le monde [9]. Cette latence dans l'atteinte des objectifs du développement durable est d'autant plus marquée dans les pays moins

développés où une défaillance au niveau des structures de stockage et de la valorisation des produits agricoles est très souvent observée.

Le Sénégal, pays agricole, est confronté à ces problèmes de SA malgré une production pouvant assurer les besoins des consommateurs dans la majorité des sous-secteurs du milieu agricole. Parmi ces sous-secteurs, l'horticulture, avec des spéculations à haute valeur ajoutée, enregistre une croissance comprise entre 5 % et 10 % depuis 2004 [10], [11] et constitue le sous-secteur le plus dynamique de l'agriculture sénégalaise. Cette performance est essentiellement portée par l'essor de la sous-filière oignon qui représente 32 % de la filière maraîchère (60 % du sous-secteur horticole) en 2015.

La production d'oignon a régulièrement augmenté au Sénégal sur les dix dernières années pour atteindre un niveau jamais égalé en 2016 (393 225 tonnes). En dépit de cet essor la couverture de la demande annuelle d'oignon (150 000 à 250 000 tonnes) reste tributaire des importations [12], [13]. Cela s'explique par la forte teneur en eau de l'oignon comprise entre 83 % et 92 % [14]–[16] selon les variétés, entraînant d'importantes difficultés de conservation aussi bien pour les producteurs que pour les consommateurs. Ainsi, l'eau dans les aliments étant l'une des principales causes de leur dégradation biochimiques et microbiologiques, sa maîtrise constitue une étape capitale dans la conservation des produits alimentaires.

Parmi les techniques de maîtrise de l'eau dans les aliments, le séchage est l'une des plus anciennes. Cependant, cette méthode de conservation demeure très énergivore et peut altérer les propriétés nutritionnelles et organoleptiques des produits. Son contrôle s'avère ainsi indispensable pour une maîtrise des coûts et de la qualité [17]–[19].

Ces constats soulèvent la problématique suivante :

« comment réduire les pertes post-récoltes afin de garantir la sécurité alimentaire tout en respectant les concepts du développement durable ? ».

Cette problématique, comporte plusieurs dimensions agricole, économique, environnementale et industrielle (transformation) entre autres.

À cet égard, l'objectif, de cette thèse de Doctorat axée sur le volet industriel, est de mettre au point un **procédé d'élimination de l'eau à moindre coût énergétique** garantissant la qualité nutritionnelle, fonctionnelle, organoleptique et préservant l'environnement.

La recherche de solutions à cette question repose sur les postulats suivants :

- ❖ l'eau est un constituant majeur dans la plupart des aliments à l'état naturel ;
- ❖ l'eau est un déterminant de la qualité des aliments notamment la texture des fruits et légumes ;
- ❖ l'eau est un facteur favorisant la détérioration des aliments ;
- ❖ la réduction de la teneur en eau par séchage constitue un moyen de conservation reconnu.

Par ailleurs, en s'appuyant sur ces postulats et sur les différents outils et méthodes de la stabilisation des aliments par la gestion de la disponibilité de l'eau, les hypothèses ci-après seront étayées :

- ❖ les variétés d'oignon ont-elles une influence sur le séchage ?
- ❖ les degrés de maturité des variétés d'oignon ont-ils une influence sur le séchage ?
- ❖ existe-t-il des températures limites inappropriées pour le séchage des quatre variétés d'oignon ?
- ❖ le séchage en serre solaire des quatre variétés d'oignon est-il tout aussi efficace, voire plus efficace, que le séchage à l'étuve et permet-il :
 - d'obtenir une poudre d'oignon stable avec une humidité inférieure ou égale à 8 % ;
 - d'assurer la qualité hygiénique du produit fini ;
 - de conserver les propriétés nutritionnelles, fonctionnelles et organoleptiques ;
 - d'obtenir une bonne productivité ?

Pour soutenir la démarche dans ces travaux, après l'introduction générale, le premier chapitre sur l'étude bibliographique comprend un sous-chapitre autour de l'état de l'art sur l'oignon, et un second sur le séchage des produits alimentaires.

Dans le second chapitre, est abordée l'application du séchage aux quatre variétés d'oignon pour tenter d'apporter des éléments de réponse aux différentes hypothèses. Ce chapitre expérimental est composé de sept sous-chapitres axés respectivement sur la présentation du matériel végétal, sur leur caractérisation biochimique et physicochimique, sur l'influence de la variété et du degré de maturité, sur la comparaison des cinétiques de séchage à l'étuve et en serre solaire, sur la modélisation mathématique de la cinétique de séchage en serre solaire, sur la détermination des isothermes de désorption et l'évaluation économique des deux modes de séchage et sur la caractérisation physico-chimique et biochimique des produits après séchage.

Enfin, seront présentées la conclusion générale de ces travaux de recherches et les perspectives.

CHAPITRE I

ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LES OIGNONS ET LE SÉCHAGE

I.1 INTRODUCTION

L'oignon, cultivé dans environ 175 pays, se place comme la deuxième culture maraîchère dans le monde après la tomate (177, 04 millions de tonnes) [20]. Consommé cru ou cuit, ce produit, très prisé dans le monde avec une consommation de 38 g / personnes / jour, pose cependant des difficultés d'approvisionnement pour les populations dans certains pays tel que le Sénégal.

Cette synthèse bibliographique a pour objectif d'identifier les leviers sur lesquels il est essentiel d'agir afin de diversifier l'offre, d'assurer une meilleure disponibilité et une accessibilité de l'oignon et d'étayer ainsi le contexte de ces travaux de recherche.

Ce chapitre comprend deux volets :

- ❖ le premier, consacré à l'état de l'art sur l'oignon, aborde la description botanique et l'écologie de la plante, la composition, l'analyse nutritionnelle, les intérêts nutritionnels et thérapeutiques, ainsi que la production d'oignon à travers le monde et l'analyse situationnelle de la filière au Sénégal ;
- ❖ le second, orienté sur l'état de l'art sur le séchage des produits alimentaires, présente, l'eau dans les aliments, l'importance du séchage dans le domaine agroalimentaire, l'évaluation du potentiel de gisement solaire du Sénégal, mais aussi l'état de l'art sur les séchoirs solaires et leurs utilisations.

I.2 ÉTAT DE L'ART SUR L'OIGNON

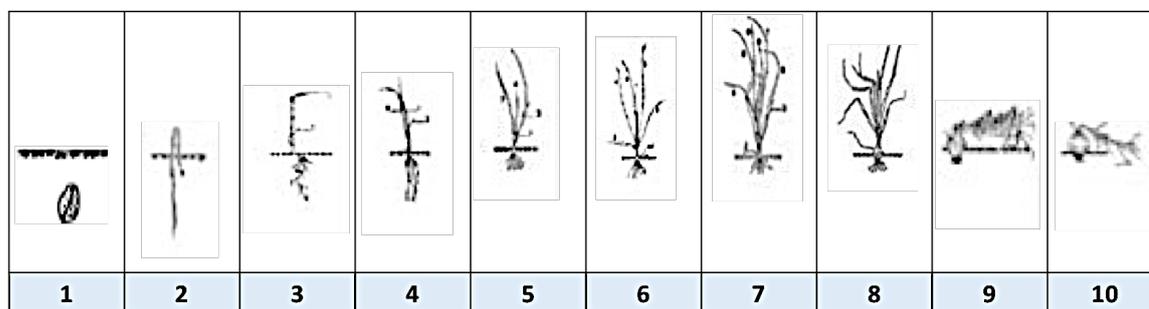
L'oignon, plante originaire d'Asie centrale, est l'un des plus anciens légumes, produit depuis l'antiquité dans le bassin de la Méditerranée pour la consommation de son bulbe. Il fut également utilisé par les Égyptiens, les Grecs et les Romains pour ses propriétés médicinales [21]. Toutefois, dans certaines zones, les fanes d'oignon sont également consommées et ont d'aussi bonnes qualités nutritionnelles que les bulbes. Par ailleurs, les modes d'utilisation dépendent fortement des caractéristiques organoleptiques des bulbes notamment de la texture et du goût, lesquels tout comme les intérêts thérapeutiques varient en fonction des variétés.

I.2.1 DESCRIPTION BOTANIQUE ET EXIGENCES ÉCOLOGIQUES DE LA PLANTE

De son nom scientifique *Allium cepa* L. var *Cepa*, l'oignon appartient à la famille des *Alliaceae*. C'est d'ailleurs l'une des rares alliées dont le bulbe ne se divise pas, contrairement à l'*Allium sativum* L. (ail) ou à l'*Allium ampeloprasum* L. (poireaux). Cette plante monocotylédone, cultivée en bisannuelle, est une herbacée vivace, pouvant atteindre une hauteur d'environ 60 à 100 cm. Elle présente des feuilles creuses de forme cylindrique, une tige florale également creuse, ainsi qu'un renflement vers sa base appelé bulbe. À la floraison, de petites fleurs (de 4 à 5 mm de

large), de couleur blanche ou verte, sont regroupées en une ombelle sphérique, en position terminale sur la tige. Le **Tableau I** montre qu'après le semi (étape 1), le cycle de développement comprend différentes étapes.

Tableau I : Cycle de développement de l'oignon [22].



Légende : (1) : Semi ; (2) : Germination, (3) : 1^{ère} Feuille, (4) : 2^{ème} et 3^{ème} Feuille, Chute du cotylédon (5) : 4^{ème} feuille et épaississement du collet, (6) : 6^{ème} à 7^{ème} feuille, dessèchement et chute des 1^{ères} feuilles, (7) : 8^{ème} à 13^{ème} feuille, début de bulbaison, (8) : épaississement du bulbe, (9) : tombaison, (10) : finition du bulbe (oignon mature).

L'oignon est une plante très sensible aux conditions de sol et de climat, mais également exigeante tant sur le plan hydrique que sur le plan de la fertilisation et sur le plan lumineux [23]. Les exigences pour une croissance optimale du bulbe sont :

❖ **Un sol argilo-sableux ou alluvionnaires, humifère, non acide de pH 6,5 à 7**

L'oignon résiste à l'humidité. Néanmoins, dès la formation du bulbe, un climat sec lui est plus favorable pour lutter contre les maladies, accélérer la maturité puis faciliter la récolte et le stockage.

❖ **Un optimum de température entre 15 et 26°C**

Selon le stade de développement, les températures exigées sont différentes. Une température fraîche est utile pour la sortie de l'état de dormance du bulbe, la croissance végétative et l'émission de la hampe florale. Mais une température > 18°C déclenche un renflement du bulbe.

❖ **La photopériode**

Physiologiquement, l'oignon est une plante de jours longs dont la croissance et la période de maturité du bulbe sont très dépendantes de la photopériode et de la température. Les besoins de domestication de la plante sont ainsi à l'origine du développement de variétés améliorées d'oignon avec des périodes de maturité adaptées aux photopériodes des zones de culture. La détermination des photopériodes critiques en dessous desquelles le grossissement des bulbes ne peut se faire introduit une classification des variétés d'oignon comme suit :

- oignon de jour court : photopériode critique entre 11h - 12h ;
- oignon de jour intermédiaire : photopériode critique entre 13h - 14h ;
- oignon de jour long : photopériode critique supérieure ou égale 16h.

Des études ont montré que plus la photopériode est longue, plus la pousse est lente, plus l'oignon est ferme et meilleure est la conservation. Selon les variétés, les bulbes se différencient par la couleur, la taille et le goût.

I.2.2 COMPOSITION, ANALYSE NUTRITIONNELLE ET INTÉRÊT THÉRAPEUTIQUE DE L'OIGNON

Le bulbe contenant majoritairement de l'eau, renferme également des macronutriments, micronutriments, vitamines et minéraux essentiels aux besoins nutritionnels de l'homme. Son utilisation comme condiment et légume dans une foison de préparations culinaires constitue un apport d'éléments bénéfiques à la santé. En effet, la nature de certaines de ces molécules tels que les antioxydants dans certaines variétés, confèrent à l'oignon un intérêt thérapeutique sur certaines pathologies [24].

I.2.2.1 COMPOSITION ET ANALYSE NUTRITIONNELLE

Constitués de bases épaissies de feuilles enveloppées les unes dans les autres, les bulbes d'oignon contiennent des macronutriments tels les glucides (des fructosanes), un faible taux de lipides et de protéines, des micronutriments et surtout des composés volatils produits par des réactions d'hydrolyses enzymatiques déclenchées par les actions mécaniques [25]. Ces substances sont responsables de la saveur, de l'odeur de l'oignon, ainsi que du larmolement lors de l'épluchage. En effet, tous les *Allium* cultivés contiennent, en faible proportion, de la S-Méthyl-L-cystéine, tandis que la S-1-Propényl-L-cystéine sulfoxyde est spécifique et prépondérante au niveau d'*Allium cepa* L. var *Cepa* [26]. La **Figure 1** ci-dessous présente les réactions aboutissant à la formation de ces composés sulfurés volatils.

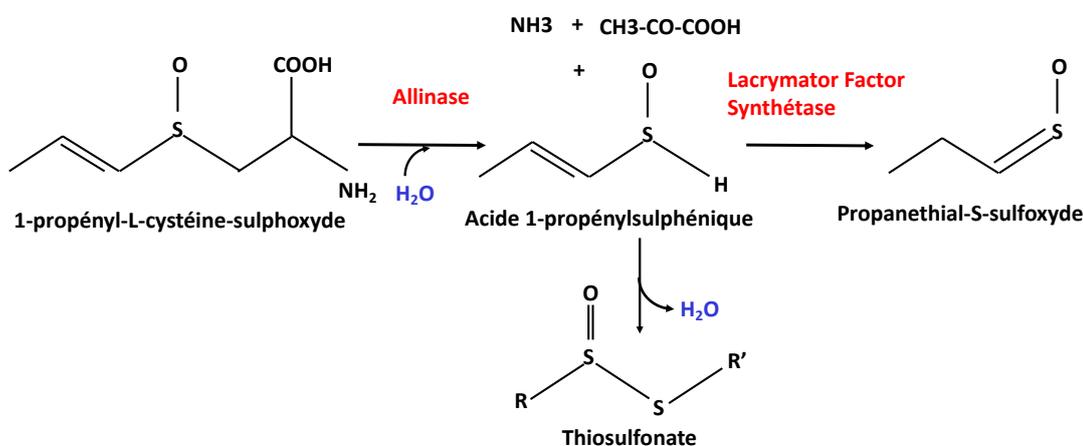


Figure 1 : Synthèse des composés volatils responsables du goût et du larmolement lors de l'épluchage et du découpage de l'oignon.

Ainsi, lors de l'épluchage et du découpage de l'oignon, l'allinase contenue dans la vacuole des cellules de l'oignon hydrolyse le précurseur S-1-propényl-L-cystéine-sulfoxyde présent dans le cytoplasme pour donner de l'acide 1-propénylsulphénique [27]. Ce dernier subit soit une condensation spontanée pour former le thiosulfonate responsable de la saveur et de l'odeur, soit une conversion sous l'action de l'enzyme Lacrymal Factor Synthétase (LFS) pour donner le propanethial-S-sulfoxyde, responsable du larmolement [28].

Les facteurs responsables du goût et de l'odeur des oignons étant différents de ceux causant l'irritation des yeux, certaines variétés peuvent ne pas provoquer de larmolement tout en conservant la saveur recherchée par les consommateurs.

Parmi les micronutriments essentiels au bon fonctionnement du métabolisme, l'oignon contient une multitude de vitamines et de minéraux tels que le potassium, le sodium, le phosphore, le sélénium, le fer et l'iode, ainsi que la vitamine A, la vitamine B et la vitamine C.

Les teneurs de quelques constituants majoritaires dans 100 g de portion d'oignon frais sont indiquées dans le **Tableau II** ci-dessous.

Tableau II : Teneur de quelques constituants majoritaires dans l'oignon cru (base humide).

Minéraux	Valeur (mg)	Macronutriments	Valeur (g)	Vitamines	Valeur (mg)
Calcium	23	Eau	89,11	Folacine	19 µg
Fer	0,21	Glucides	9,34	B6	0,12
Magnésium	10	Protéines	1,10	Choline	60,1
Phosphore	29	Cendres	0,35	C	7,4
Potassium	146	Lipides	0,10		
Sodium	4	Énergie en Kcal	40		
Zinc	0,17	Fibres alimentaires totales	1,7		
Cuivre	0,039	Sucres Réducteur	4,24		
Manganèse	0,129				
Sélénium	0,5 µg				

Source : table de composition des aliments et « Nutrient Database » [14], [29].

De l'analyse des données sur les macronutriments (**Tableau II**) versus les valeurs moyennes de macronutriments dans les légumes, il ressort que :

- ❖ les teneurs en lipides (0,10 %), protéines (1,10 %) et fibres alimentaires (1,7 %) de l'oignon sont inférieures aux teneurs moyennes des légumes qui sont respectivement de 0,57 %, 2,21% et 2,34 % ;
- ❖ tandis que celle des glucides (9,34 %) est supérieure à la teneur moyenne des légumes (6,35 %).

En se référant aux recommandations du règlement européen 1169/2011, relatives aux Valeurs Nutritionnelles de Référence (VNR) quotidiennes, présentées en *Annexe A*, il apparaît que :

- ❖ les protéines, glucides et fibres assurent respectivement 2, 3 et 4 % des VNR ;
- ❖ les vitamines et les minéraux de l'oignon ont des apports compris entre 1 % et 5 %, exceptées pour les vitamines B6 (8,6 %), B9 (9,5 %) et C (9,3 %).

Concernant les polyphénols, les flavonoïdes sont majoritaires avec la classe des flavonols présente aussi bien dans les oignons blanc, jaune et rouge (violacée), tandis que la classe des anthocyanines est trouvée uniquement dans les oignons rouges (violacée). La quercétine, l'un des polyphénols au pouvoir antioxydant le plus élevé, est le flavonol prépondérant dans les oignons. Par ailleurs, la teneur en polyphénol totaux des oignons crus dépend de la couleur avec pour l'oignon blanc une teneur de 5,41 mg EAG / 100 g, pour l'oignon jaune 62,98 mg EAG / 100 g et pour l'oignon rouge 139,51 mg EAG / 100 g [30]. Les teneurs en phénols totaux des oignons jaune et rouges crus dépassent ainsi largement la teneur moyenne dans les légumes estimée environ à 52,01 mg EAG / 100 g [31]. Cependant, le mode de préparation influe sur ces apports. D'après les travaux de Lanzotti en 2006 [32], les apports de certains macronutriments (à l'inverse des micronutriments) diminuent avec la cuisson amenuisant ainsi les intérêts nutritionnels et thérapeutiques escomptés.

I.2.2.2 INTÉRÊT THÉRAPEUTIQUE DE L'OIGNON

Certaines plantes sont connues pour leurs richesses en composés soufrés (acides aminés soufrés non protéiques, les glucosinolates et leurs dérivés). Ces composés présentent un intérêt fonctionnel pour lutter contre certaines pathologies. Les deux familles les plus connues sont les *Brassicaceae* et les *Alliaceae*. Depuis l'Antiquité, les Égyptiens utilisaient déjà l'oignon, qui appartient à la famille des *Alliaceae*, pour ses vertus thérapeutiques entre autres comme anti-inflammatoire et pour lutter contre la mauvaise circulation sanguine. Toutefois, les preuves scientifiques de ces allégations de santé n'ont été disponibles qu'à partir des années 70.

Avec une Charge Acide Rénale Potentielle (Potential Renal Acid Load : PRAL) de -1,5 mEq / 100 g, l'oignon cru, tout comme les aliments de la famille des *Alliaceae* tels que l'ail (ail cru - 1,7 mEq / 100 g) et le poireau (poireau cru -1,8 mEq / 100 g), appartiennent à la catégorie d'aliments alcalinisants dont le rôle dans l'équilibre acido-basique du corps humain est avéré.

Par ailleurs, Selon les variétés, l'indice « Capacité Antioxydante Totale » (Total Antioxydant Capacity : TAC) de l'oignon cru variant entre 523 et 1077 μ moles, confère à l'oignon des propriétés antioxydantes très bénéfiques également pour la santé de l'homme. La panacée de molécules bioactives de l'oignon sous-tend ses différentes vertus thérapeutiques que sont entre autres :

- ❖ les propriétés antimicrobiennes, antifongiques liées à la présence des composés organosulfurés [26], [33] ;
- ❖ les effets bénéfiques dans le cadre de la prévention et ou le traitement de certaines pathologies telles que :
 - les maladies cardiovasculaires par l'action sur l'agrégation plaquettaire, sur le cholestérol-LDL et sur les radicaux libres. L'activité contre l'agrégation plaquettaire est liée aux composés sulfurés et aux antioxydants principalement la quercétine (biodisponibilité appréciable), lesquels agiraient de façon synergique [34]–[36] tandis que l'action contre le mauvais cholestérol et la protection contre les radicaux libres sont liées à la quercétine [37]. Les variétés d'oignon rouge avec une teneur en polyphénols supérieur à celle des oignons de couleur pâle, ont une meilleure activité antioxydante [38];
 - l'athérosclérose par la fluidification du sang en réduisant l'agrégation plaquettaire. Les composés de l'oignon évitent ainsi la formation de caillot, étape décisive dans l'athérosclérose ;
 - le diabète par l'action hypoglycémiant des allïcines, mais également l'inhibition de la destruction de l'insuline en évitant sa ventilation dans le foie ;
 - le cancer par l'action des antioxydants sur les radicaux libres [39], mais également par le biais des composés soufrés qui limitent la multiplication des cellules cancéreuses. Ainsi, la consommation d'environ 1 à 7 portion (s) d'oignon par semaine réduit les risques de cancer du côlon, du larynx et des ovaires. Des résultats convergents dans le même sens sont observés dans le cas du cancer du cerveau, mais aussi le cancer de l'estomac et de l'œsophage [40];
 - l'asthme par l'action inhibitrice de la quercétine sur la formation des médiateurs de l'inflammation (les prostaglandines et les leucotriènes, en même temps que la libération de l'histamine). [24].

Il faut cependant noter que ces effets bénéfiques sur la santé de l'homme ne sont pas seulement liés aux composés soufrés et aux polyphénols, mais les vitamines et les minéraux y jouent également un rôle essentiel. Selon le règlement (CE) n°1924/2006 relatif aux allégations nutritionnelles et de santé, et au regard de la composition de l'oignon cru et cuit, les allégations suivantes peuvent être utilisées, particulièrement :

- la protection contre le stress oxydatif et le maintien d'un système immunitaire normal liés au sélénium ;
- le transport d'oxygène favorisé par la vitamine B6 (pyridoxine), coenzyme participant dans la production de globule rouge et contribuant aussi au bon fonctionnement système immunitaire ;

➤ la protection contre les infections grâce à la vitamine C, antioxydant, contribuant à la santé des os et favorisant l'absorption du fer.

Toutefois, il convient de noter que cette foison d'effets bénéfiques sur la santé est fonction de la variété, mais également fonction du mode d'utilisation. D'après certains auteurs, aussi bien l'activité anti agrégation plaquettaire que l'activité antioxydante baisse avec la cuisson à l'eau [41], [42], mais augmente avec une cuisson au four ou en les faisant sauter car l'eau s'évapore augmentant ainsi la concentration de ces antioxydants [43].

1.2.3 PRODUCTION D'OIGNON DANS LE MONDE

La production mondiale, estimée à 93,16 millions de tonnes en 2016 est assurée par cinq grands pays (**Figure 2**) que sont la Chine avec la plus grande production avoisinant 22,55 millions de tonnes, suivie par l'Inde, les États-Unis, l'Égypte, l'Iran avec respectivement, environ 19,40 ; 3,17 ; 2,50 et 2,10 million de tonnes [20].

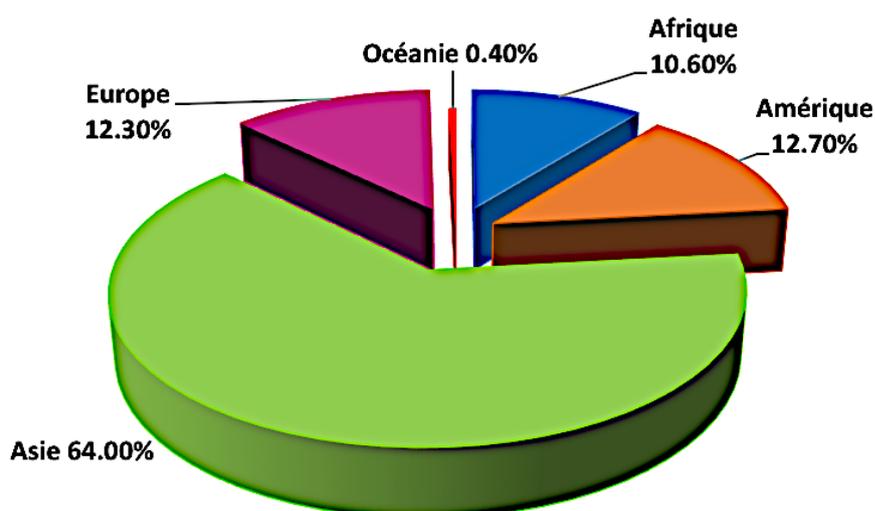


Figure 2 : Répartition de la production mondiale d'oignon par région.
(moyenne de 2000 à 2014) [20].

Ces moyennes sont obtenues à partir des statistiques de la base de données FAOSTAT sur la production par continent de 2000 à 2014 (**Annexe B**). Le continent asiatique (**Figure 2**) se positionne largement en tête avec 64,1 % de la production sur les quinze dernières années (2000 à 2014), suivi des continents Américain et Européen, lesquels ont des pourcentages sensiblement proches, avec respectivement 12,7 et 12,3 %, puis les continents africain et océanique avec 10,6 % et 0,40 %. D'après les moyennes de production calculées sur cette période, le classement des cinq pays producteurs *versus* le classement en 2014, demeure inchangé, excepté pour la 4^{ème} place occupée par la Turquie sur la période de 2000 à 2014 avec une moyenne de 1,94 millions de

tonnes. En 2014, la Turquie passe à la 7^{ème} place (production de 1,79 millions de tonne), et l'Égypte, qui n'était pas classé parmi les cinq premiers pays producteurs sur la période de 2000 à 2014 (avec une moyenne de 1,45 millions de tonne), occupe la 4^{ème} place en 2014 (production de 2,51 millions de tonne). Ainsi, Sur cette période la Chine et l'Inde, assurent à elles seules, environ 44,8 % de la production mondiale contre 47,4 % en 2014. En effet la production d'oignon par la Chine et l'Inde n'a cessé d'augmenter sur la période allant de 2000 à 2014 et cette croissance est d'autant plus accentuée en 2014.

Quant à la production d'oignon en Afrique elle est estimée à 10,43 millions de tonnes en 2014 (11,8 % de la production mondiale) contre 7,4 millions de tonnes en moyenne sur la période allant de 2000 à 2014 (10,6 % de la production mondiale). Sur cette période, la production africaine est assurée en majeure partie par l'Afrique du Nord avec 58,3 %, l'Afrique de l'Ouest avec 21,8 % et l'Afrique de l'Est pour 10,7 %. Le tableau des données à partir desquelles sont calculées les proportions par zone en 2014 est présenté en Annexe C. D'après l'analyse détaillée de la production d'oignon en Afrique par pays en 2014, il apparaît que plus de la moitié de cette production est assurée par quatre pays que sont l'Égypte (2,50 millions de tonnes), l'Algérie (1,34 millions de tonnes), le Soudan (1,06 millions de tonnes) et le Nigéria (985 milles tonnes).

Il convient de noter que le Sénégal, pays sur lequel porte nos travaux de recherche sur la valorisation de la production d'oignon, n'est classé qu'à la 9^{ème} place en Afrique, avec une production de 245 milles tonnes en 2014. La consommation en oignon y est estimée à environ 13 kg / personne / an [44] et représente environ 25 % des dépenses de légumes des ménages sénégalais. Ceci place le Sénégal au second rang des pays consommateurs d'oignon en Afrique de l'ouest, derrière le Niger (16 kg / personne / an). Cependant, un focus du classement dans la zone Afrique de l'ouest qui assure 21,8 % (soit 2,3 millions de tonnes) de la production africaine, montre que le Sénégal, où l'oignon fait partie des produits de consommation de base, occupe en 2014, la 3^{ème} place avec 10,8 % de la production en Afrique de l'ouest derrière le Niger (34,4 %) et le Nigéria (43,3 %). La Figure 3 ci-après présente l'évolution de la production en Afrique de l'ouest sur la période de 2000 à 2014 [20].

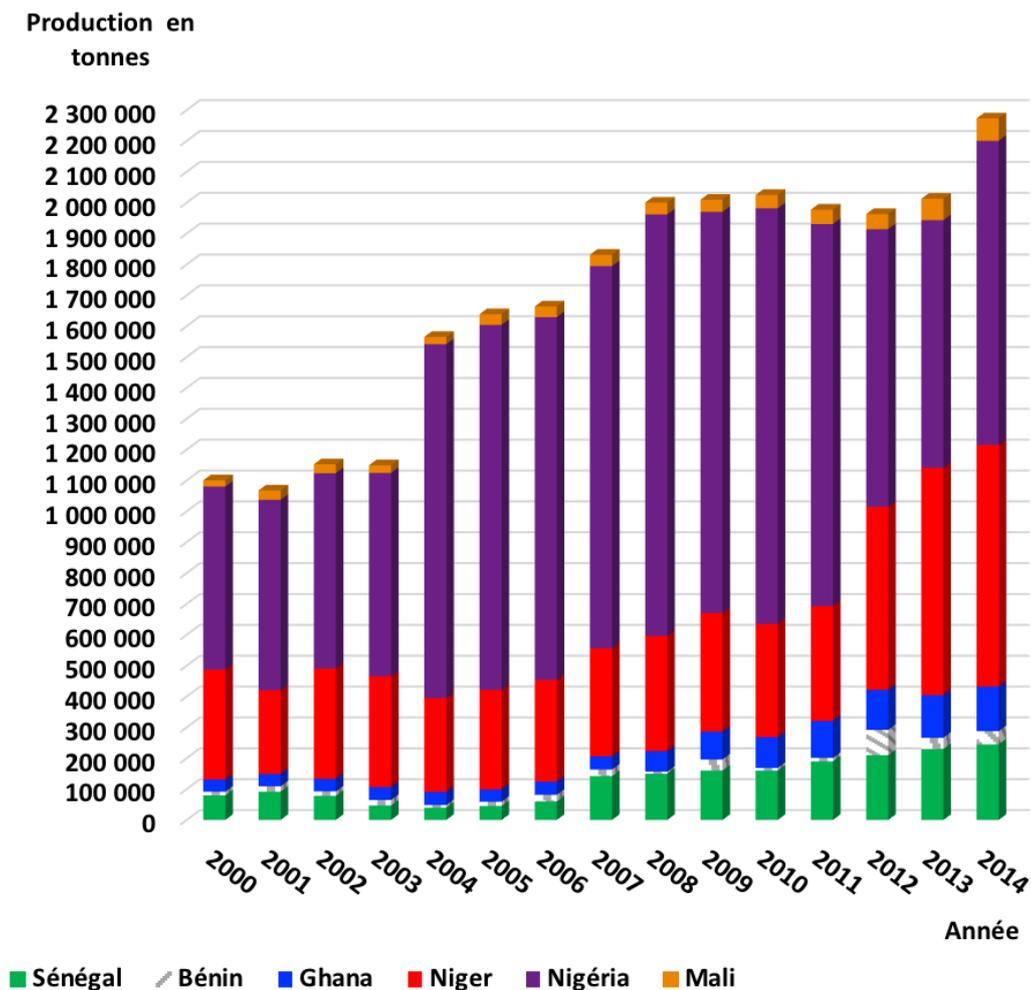


Figure 3 : Évolution de la production d'oignon en Afrique de l'ouest.

(Les données de la Côte-d'Ivoire et du Burkina Faso ne sont pas disponibles sur le site de la FAO).

Le Nigéria, le Sénégal et le Niger assurent à eux trois environ 88,5 % de la production d'oignon en Afrique de l'Ouest. D'après le Programme d'Appui aux Filières Agro-Sylvo-Pastorales (PAFASP) au Burkina Faso, ce dernier se classe 4^{ème} producteur d'oignon en Afrique de l'ouest avec une production estimée à 329 319 pour la campagne de 2010, tandis que celle de la Côte d'Ivoire est d'environ 5000 à 7000 tonnes en 2014.

Par ailleurs, dans la majorité de ces pays où l'oignon occupe une place importante dans l'alimentation et constitue environ 10 à 25 % de la consommation des ménages, la production ne permet pas de couvrir les besoins des populations. Ils recourent aux importations pour satisfaire la demande. Les exportations d'oignon en Afrique de l'ouest sont ainsi quasi inexistantes. En effet, seul le Niger, disposant d'une production d'oignon excédentaire, parvient à exporter. Le Niger se classe 15^{ème} exportateur mondial avec 94 393 tonnes en 2013.

Une analyse de la filière oignon au Sénégal s'avère indispensable afin d'identifier les leviers pour pallier les importations.

I.2.4 LA FILIÈRE DE L'OIGNON AU SÉNÉGAL

L'agriculture, activité phare du secteur primaire du Sénégal symbolise un pilier essentiel de l'économie. En effet, en 2015 la population rurale représente 56,3 % [20], [45], dont 31 % [46] est agricole et éco-active. L'agriculture particulièrement pluviale et saisonnière, a contribué pour environ 18 % du PIB et constitue un des leviers phares pour assurer la sécurité alimentaire.

Fort de ce constat, l'ensemble des programmes agricoles élaborés par les gouvernements successifs depuis la Loi d'Orientation Agro-Sylvo-Pastorale (LOASP) en 2004, sont tous axés sur la vision capitale de faire de l'agriculture le nerf central du développement économique et social du Sénégal. En outre, ces orientations stratégiques sont parfaitement en ligne avec les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD) précisément celui qui concerne l'éradication de la pauvreté [47], [48].

Parmi ces programmes agricoles, le dernier en date est, le Programme de Relance et d'Accélération de la Cadence de l'Agriculture au Sénégal (PRACAS) en 2012. Le PRACAS, volet agricole de la politique stratégique de développement du Sénégal appelée le Plan Sénégal Émergent (PSE), a comme objectif d'assurer l'autosuffisance alimentaire, de réduire les importations de denrées de consommation de base, d'augmenter les revenus et par conséquent de réduire la pauvreté. À travers des programmes publics ciblés, le PRACAS octroie une place primordiale au développement du sous-secteur horticole. En dépit de ces efforts de dynamisation de la sous-filière oignon qui ont donné des résultats remarquables avec une augmentation significative de la production, le Sénégal reste toujours tributaire des importations pour couvrir la demande des consommateurs (**Figure 4**).

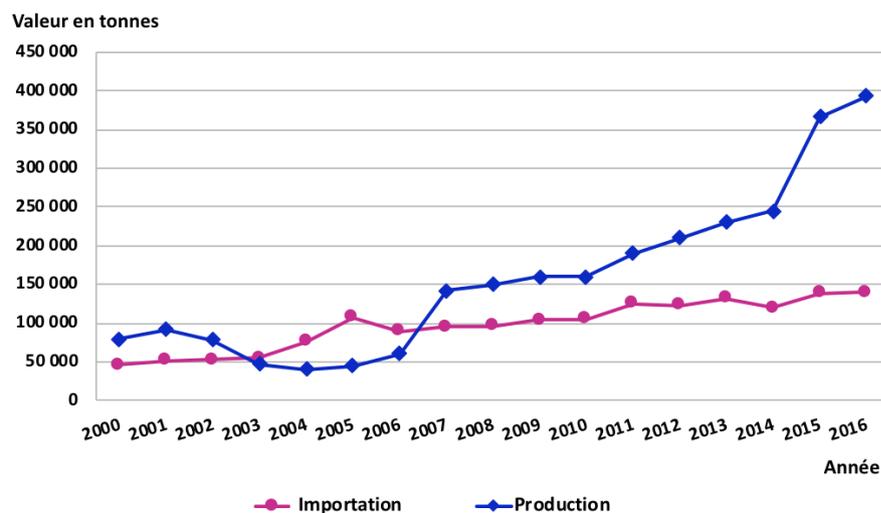


Figure 4 : Évolution des importations d'oignons versus celle de la production au Sénégal.

Source : [10], [20].

Les importantes pertes post-récolte, causes de cette dépendance, incitent certains acteurs à réfléchir sur d'éventuelles possibilités de transformation des bulbes afin d'augmenter la durée de

conservation et surtout remédier à la saisonnalité [49]. Différentes voies de valorisation existent à ce jour dans la littérature, parmi lesquelles peuvent être citées entre autres la déshydratation, la surgélation. Les produits déshydratés disponibles sous différentes formes telles les lanières, les dés, la semoule et la poudre sont surtout des produits intermédiaires utilisés par l'industrie agroalimentaire pour la fabrication de charcuteries, potage, soupe, chips, bouillons culinaires. En revanche, les produits surgelés sont utilisés aussi bien au niveau des ménages que par les industriels. Force est de constater que la transformation ainsi que l'utilisation de ces produits transformés très répandues dans les pays occidentaux, ne le sont pas au Sénégal où la consommation de bulbes se fait cuits ou crus. Un autre mode de consommation indirecte passe par l'utilisation des bouillons culinaires (fabriqués au Sénégal ou importés), dont l'un des ingrédients de base est la poudre d'oignon. Les industriels implantés au Sénégal importent la poudre d'oignon car cette dernière n'est pas produite localement.

En résumé, les goulots d'étranglement majeurs à l'atteinte de l'autosuffisance réelle en oignon, une des principales denrées de base au Sénégal, sont les conditions de stockage et la transformation afin de diversifier l'offre de produits et les modes d'utilisation. Le développement d'un nouveau maillon de la chaîne de valeur, que sont les transformateurs, contribuerait à couvrir les besoins en oignon, mais améliorerait également la compétitivité de la sous-filière et générerait par la même occasion des revenus complémentaires conséquents (en se référant aux conditions les plus drastiques pour 2016 à savoir 140 000 tonnes importés, 80 FCFA / kg pour le coût de production le plus élevé, pertes post-récolte de 40 %) déterminants dans la lutte contre la vulnérabilité des ménages [50].

I.3 ÉTAT DE L'ART SUR LE SÉCHAGE DES PRODUITS ALIMENTAIRES

Les produits alimentaires sont riches en eau à des proportions variables selon les catégories d'aliments. Ces teneurs sont ainsi comprises pour les produits animaux entre 65 % et 70 %, pour les céréales entre 10 % et 20 % et pour les fruits et légumes entre 80 % et 95 %. La richesse en eau de certains produits agricoles est la cause de leur périssabilité et rend ainsi difficile leur conservation et leur disponibilité hors saison. Pour exemple, l'analyse situationnelle de la filière oignon au Sénégal a montré des pertes comprises entre 5 et 40 % de la récolte jusqu'à six mois de conservation.

I.3.1 L'EAU DANS LES ALIMENTS

L'eau dans les aliments assure de multiples fonctions, dont :

- ❖ la solubilisation (ou dispersion) : l'eau dans les aliments est le solvant des constituants hydrophiles ;
- ❖ la structuration : l'eau détermine la configuration des macromolécules alimentaires, notamment les protéines et les glucides ;
- ❖ la mobilisation : le facteur de mobilité le plus répandu dans les produits alimentaires.

La teneur en eau d'un aliment, appelée encore humidité du produit, est définie par la quantité d'eau contenue dans le produit. Elle est exprimée en pourcentage soit du poids total soit du poids de matière sèche de ce dernier. La relation entre les deux expressions de la teneur en eau est la suivante :

Teneur en eau base humide (X') en kg eau / kg produit :

$$X' = \frac{X}{(1 + X)} \quad \text{Équation 1}$$

Teneur en eau sur la base matière sèche (X) en kg eau / kg matière sèche :

$$X = \frac{X'}{(1 - X')} \quad \text{Équation 2}$$

L'implication de l'eau, constituant indispensable des denrées alimentaires, dans les interactions multiples avec les autres constituants est régie par l'activité de l'eau (A_w). Cette dernière est définie par le rapport entre la pression partielle de vapeur de l'eau du produit (P_p) et la pression partielle de vapeur de l'eau pure (P_e) à une température donnée.

$$A_w = \frac{P_p}{P_e} \quad \text{Équation 3}$$

L'activité de l'eau traduit la disponibilité de l'eau en tant que solvant ou réactif pour des réactions biochimiques, physico-chimiques et le développement des microorganismes dans les matrices organiques. Elle est très déterminante dans la conservation des produits alimentaires.

Les limites maximales d'Aw (**Tableau III**) pour le développement de certains microorganismes dépendent du type de produits.

Tableau III : Valeurs limites de l'activité de l'eau favorables au développement des microorganismes dans certains produits

Teneur en eau et type de produits	Valeurs maximales d'Aw	Types de microorganismes
Produits frais (légumes, viandes...)	0,95 à 1	Escherichia, Bacillus, Clostridium perfringens, certaines levures...
Flocon de céréales à 10 %	0,65 à 0,75	Moisissures xérophile, saccharomyces bisporus
Fruits secs entre 15 à 20 %	0,60 à 0,65	Levures osmophiles, certaines moisissures
Épices à 10 %	0,50	
Œuf en poudre à 5 %	0,4	Pas de croissance microbologique
Cake entre 3 à 5 %	0,3	
Flocons de céréales et fruits secs à 5 %	0,2	

Selon les valeurs de l'Aw comprises entre 0 (pour les produits secs dont le degré de liberté de l'eau dans la matrice est quasi nul) et 1 (pour l'eau pure exempte de soluté), l'eau peut exister dans les aliments sous trois formes favorables ou non au processus d'altération. Son importance sur les réactions physico-chimiques dans les aliments est présentée sur la **Figure 5**.

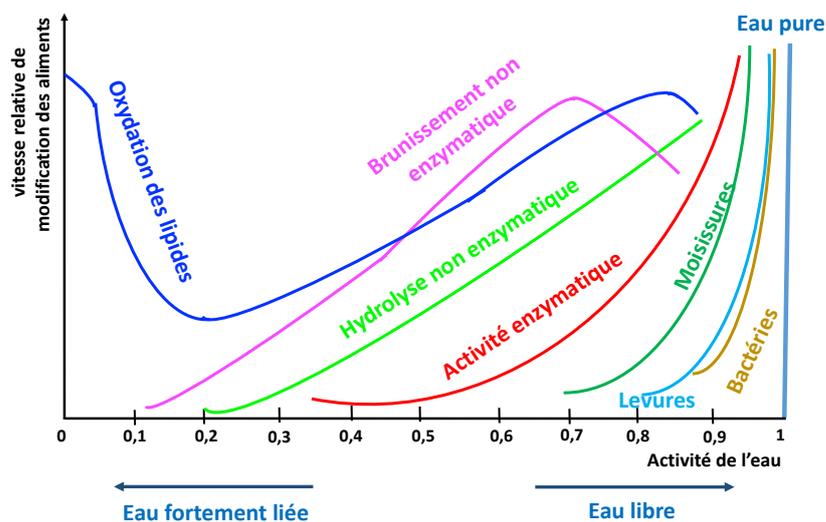


Figure 5 : Modification des aliments en fonction de l'activité de l'eau.

La **Figure 5**, ci-dessus reflète le fait que les produits alimentaires soient des systèmes biologiques complexes, foyers de multiples réactions responsables de leur instabilité. Les trois types de comportements de l'eau dans les aliments et leurs impacts sur la stabilité des produits sont :

- ❖ Eau fortement liée : $Aw < 0,35$

L'eau fortement liée se trouve sous forme d'une couche monomoléculaire rigide à la surface des molécules. Elle correspond à l'eau associée avec les constituants organiques polaires (protéines, glucides, etc.) des aliments par des liaisons H et des forces de Van Der Waals. Cette eau n'est ni disponible comme moyen de transport, ni comme solvant pour les réactions biologiques et ne peut se congeler. Les activités de l'eau de l'ordre de 0,25 à 0,35 garantissent ainsi une stabilité maximale des produits sans adjonction de conservateurs.

❖ Eau faiblement liée : $0,35 \leq A_w \leq 0,65$

Elle correspond à la couche polymoléculaire successive à la première couche monomoléculaire fortement liée, mais également à l'eau de remplissage des pores. Cette eau pseudo liquide absorbée en surface, est congelable et disponible comme solvant mais pas comme moyen de transport. Elle est donc moyennement réactive.

❖ Eau libre : $A_w > 0,65$

L'eau est disponible pour toutes les fonctions et peut se congeler.

Ainsi, malgré ces rôles fondamentaux sur le plan nutritionnel et organoleptique, l'eau constitue un frein à la conservation des produits alimentaires, car elle contribue favorablement à l'évolution des réactions de modification selon les conditions environnantes. Les bactéries, levures et moisissures, responsables en grande partie de l'altération des aliments ne se développent respectivement qu'à partir d'une activité de l'eau supérieure à 0.92, 0.87 et 0.80.

Ainsi, en Industrie Agro-Alimentaire (IAA), la mise au point de procédés de stabilisation axés sur la réduction de la teneur en eau tout en préservant la qualité des aliments constitue un important pilier dans la conservation des aliments. Parmi les techniques de stabilisation, peuvent être citées entre autres l'appertisation, la congélation, la surgélation et le séchage. Ce dernier, l'une des techniques les plus anciennes, nécessite une maîtrise afin de prévenir contre certains effets délétères lors du stockage des produits.

1.3.2 IMPORTANCE DU SÉCHAGE DANS LE DOMAINE AGROALIMENTAIRE

Le procédé de séchage, commun à toutes les industries confondues, constitue une étape primordiale dans l'agroalimentaire, avec comme objectif d'allonger les durées de conservation et de réduire les volumes. Par conséquent, les besoins en emballage, les coûts de stockage et de transport sont également réduits. L'allongement de la durée de conservation des aliments passe par l'inhibition partielle ou totale voire la destruction des mécanismes de dégradation dépendants de la teneur en eau, particulièrement de sa disponibilité. Ainsi, au cours du séchage l'eau libre est d'abord évaporée, suivie par l'eau de plus en plus liée. L'eau liée étant plus difficile à éliminer, la quantité d'énergie nécessaire pour vaporiser la même quantité d'eau augmente au cours du séchage. Le dernier gramme d'eau évaporé coûte ainsi, beaucoup plus d'énergie que le premier.

Cependant, ce procédé, jadis traditionnel (exposition directe des produits au soleil), a beaucoup évolué et fait intervenir de nos jours des technologies innovantes. Plusieurs travaux antérieurs décrivent les phénomènes en jeu au cours de cette opération unitaire en Industries Agro-Alimentaire (IAA).

I.3.2.1 PRINCIPE DU SÉCHAGE

Le séchage couple deux phénomènes de transfert que sont le transfert de chaleur et le transfert de matière. Ces transferts sont à l'origine de deux opérations que sont :

- ❖ un **changement d'état physique** faisant passer l'eau de l'état liquide ou solide à l'état de vapeur. Ce changement d'état nécessite de l'énergie apportée par l'échange de quantité de chaleur sous l'action d'un gradient de température ;

- ❖ et une **migration de l'humidité du produit**. Ce transfert de quantité de matière s'opère selon différents mécanismes tels que la diffusion du liquide (si la température du produit est inférieure à celle d'ébullition du liquide), la diffusion de la vapeur (si le changement d'état physique s'opère à l'intérieur du produit) et la différence de pression hydrostatique (si le taux de vaporisation interne ne dépasse pas le taux de transport de vapeur à travers le produit).

Ces deux opérations corrélées sont indispensables à l'élimination de l'eau des aliments et plusieurs théories ont été développées pour décrire les phénomènes en jeu [17], [51], [52].

I.3.2.1.1 DESCRIPTION PHENOMENOLOGIQUE DU SECHAGE

Le processus de séchage repose sur des phénomènes complexes, dont la description fait l'objet de plusieurs théories prenant en compte séparément ou simultanément les phénomènes de transfert de masse et de chaleur.

- ❖ **Théorie de la diffusion**

Cette théorie, initiée par Lewis en 1921 [53], repose sur la diffusion de l'eau de l'intérieur du produit vers l'extérieur sous l'effet du **gradient de concentration** et son évaporation à la surface. Cette dernière n'est observée que si la diffusion est suffisante pour compenser l'eau évaporée en surface. La théorie de la diffusion est gouvernée par la loi de Fick et suppose des conditions de séchage constantes ainsi qu'un matériau non déformable et un coefficient de diffusion constant au cours du séchage. En 1929, Sherwood *et al.* ont repris les travaux de Lewis sur le bois et l'argile et ont obtenu des résultats assez satisfaisants avec les valeurs expérimentales. Ils ont montré la difficulté de corréliser la décroissance du coefficient de diffusion avec les profils d'humidité. Les limites de cette théorie résident sur ces hypothèses simplificatrices [52]–[56]. Cette théorie décrit bien le séchage de certains produits alimentaires.

- ❖ **Théorie capillaire**

En 1937, Hougén *et al.* développent l'idée que le séchage des matériaux granulaires ou poreux (profil d'humidité dans un lit de sable) repose uniquement sur les forces capillaires et non sur le gradient de concentration. La différence de pression entre l'eau et l'air à l'interface constitue le potentiel capillaire, moteur de la migration de l'eau [57].

❖ **Théorie de Krisher**

D'après Krisher (1938), le procédé de séchage combine les deux théories et se déroule en deux phases. La première phase du séchage gouvernée par les forces capillaires, correspond au déplacement de l'eau à l'état liquide vers la surface tandis que la seconde phase correspond au drainage de la vapeur d'eau contrôlée par le gradient de concentration de vapeur.

❖ **Théorie de Luikov**

En 1934, Luikov découvre le phénomène de thermo-diffusion. S'appuyant sur les équations fondamentales de la thermodynamique et le processus de l'irréversibilité, il montre en 1966 que la migration de l'eau, aussi bien à l'état liquide qu'à l'état de vapeur, ne peut être gouvernée uniquement par un gradient de concentration mais implique également un gradient de température. Cette théorie décrit parfaitement les transferts couplés de chaleur et de masse dans les milieux poreux [15], [58]–[60]. Toutefois, sa limite est le taux de changement de phase relatif à la résistance de la diffusion de la vapeur dans le produit. Ce taux est un paramètre adimensionnel variable au cours du séchage et sa détermination ne peut être qu'empirique.

❖ **Théorie de Philip et De Vries**

En 1957, ils développent l'idée que la diffusion de vapeur et la capillarité sont responsables de la migration de l'eau. Cette théorie, gouvernée par le couplage du transfert de chaleur et de masse et l'effet de la pesanteur, a été appliquée au séchage de matériaux de construction [61]–[63].

❖ **Théorie de Whitaker**

Whitaker en 1977, assimile le milieu poreux à un milieu continu en introduisant la notion de Volume Élémentaire Représentatif (VER) à l'échelle des pores. Cette théorie repose sur les équations de conservation de masse et de chaleur pour les phases solide, liquide et vapeur existantes au sein du VER et la prise des valeurs moyennes. Elle permet de décrire les profils de teneur en eau, les flux de liquide et de vapeur ainsi que les profils de pression et de température à tout instant [52], [54], [64]–[66].

I.3.2.1.2 DIFFERENTS MODES DE SÉCHAGE

Les sources d'énergie utilisables pour le changement d'état de l'eau en vapeur, ainsi que les principes impliqués dans l'élimination de la vapeur d'eau générée sont diverses et sous-tendent la classification du procédé de séchage en différents modes :

❖ **Séchage par sublimation**

Les aliments sont d'abord congelés avant que les cristaux de glace ne subissent une sublimation sous vide pour être éliminés sous forme de vapeur.

Les propriétés organoleptiques et nutritionnelles des produits alimentaires séchés par lyophilisation sont bien préservées et leur réhydratation se fait convenablement. Toutefois, l'élimination de l'eau liquide des aliments en passant par une congélation reste un procédé très onéreux, donc difficilement applicable au Sénégal. Ce mode séchage est réservé particulièrement aux produits à forte valeur ajoutée.

❖ **Séchage par rayonnement**

Les rayonnements électromagnétiques, émis soit par un champ électrique alternatif, soit par un émetteur infrarouge, entraînent une agitation moléculaire qui se traduit par une augmentation de la température du produit donc par une élimination de l'eau. Ce mode de séchage est plus adapté aux produits sous forme de plaque (papier, tissu, viande...) ou sous forme granulaire avec de petites épaisseurs. Il doit nécessairement être couplé à un courant d'air chaud pour une meilleure efficacité.

❖ **Séchage par ébullition (conduction)**

L'apport d'énergie nécessaire à l'ébullition de l'eau est assuré soit par conduction au travers d'une paroi chauffée en contact directe avec le produit, soit par immersion dans de l'huile, soit par rayonnement. Le fluide caloporteur généralement utilisé est de la vapeur à environ 150 °C dans le cas d'une paroi chauffante. L'intérêt de ce type de séchage est double car permet de réduire les effluents gazeux et également de récupérer les vapeurs libérées à toutes fins utiles.

❖ **Séchage par entraînement (convection)**

Le fluide caloporteur est un gaz directement en contact avec le produit à sécher.

Ce mode de séchage est de loin le plus usité en industries alimentaires toutes filières confondues car moins coûteux que la sublimation et souvent privilégié par rapport au séchage par ébullition afin de préserver la qualité des aliments. En effet, le séchage par convection assure une déshydratation des produits alimentaires à des températures inférieures à 100°C. Dans ce cas de séchage, le gaz généralement utilisé est de l'air chaud et sec. La **Figure 6** ci-dessous schématise le principe de séchage par entraînement.

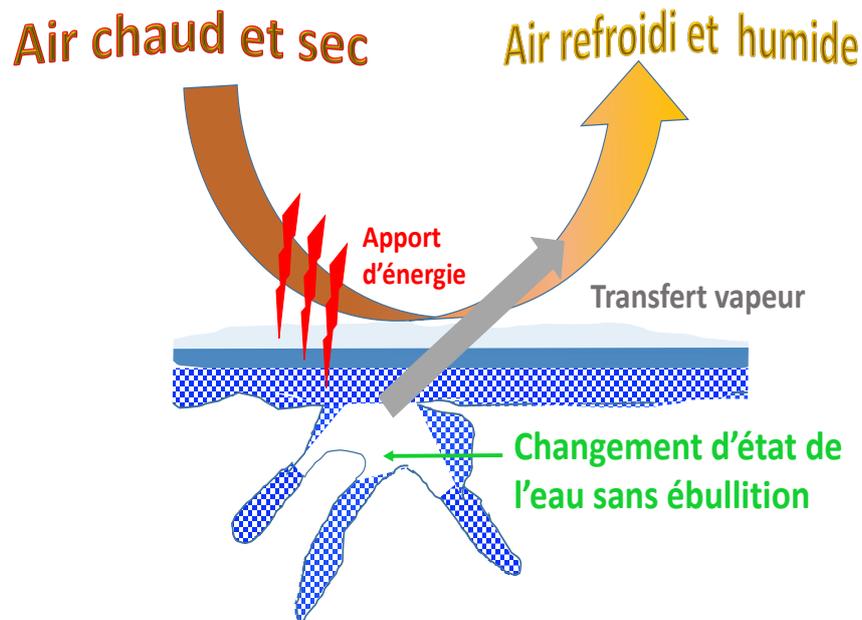


Figure 6 : Principe du séchage par entraînement avec de l'air chaud.

Le produit à sécher doit se trouver indispensablement à une température inférieure à celle du fluide caloporteur. Au contact de l'air chaud, l'écart de température et l'écart de pression entre le produit à sécher et l'air sous-tendent respectivement le transfert par convection de la chaleur utile à la vaporisation de l'eau et à son évaporation sans ébullition. La circulation de l'air de séchage peut se faire, soit par convection naturelle (la circulation d'air se fait par effet de cheminée dû au réchauffement ou par action du vent au niveau des points d'aération), soit par convection forcée (circulation d'air par action mécanique). Cette dernière améliore la vitesse de séchage des produits et permet de réduire le temps d'exposition des produits. La synthèse bibliographique est ainsi axée pour la suite sur le séchage par convection utilisant l'air comme fluide caloporteur.

1.3.2.2 QUELQUES DÉFINITIONS

Les matrices alimentaires disposent très souvent de propriétés hygroscopiques liées aux forces capillaires qui retiennent l'eau en phase liquide. La manifestation de cette hygroscopicité dépend de certaines grandeurs caractéristiques aussi bien de l'air de séchage que de la matrice alimentaire. Ces grandeurs, déterminantes pour la maîtrise du procédé de séchage [17], sont entre autres :

❖ L'Humidité Relative (HR)

L'humidité relative est caractérisée par le rapport entre la pression partielle de vapeur de l'eau dans l'air (P_a) et la pression partielle de vapeur saturante (P_{vs}). Elle permet de quantifier le niveau de saturation de l'air en eau.

$$HR = \frac{Pa}{Pvs} * 100 \quad \text{Équation 4}$$

❖ **L'Humidité d'Équilibre du produit (HE)**

À une température donnée, les matrices hygroscopiques tendent à se mettre à l'équilibre avec le milieu ambiant. À l'équilibre, $P_p = P_a$ et $P_e = P_{vs}$, par conséquent, l'Humidité Relative à l'Équilibre (H_{RE}) est proportionnelle à l' A_w :

$$HRE = A_w * 100 \quad \text{Équation 5}$$

L'échange d'eau entre l'air ambiant et la matrice hygroscopique est nul lorsque l'humidité d'équilibre du matériau hygroscopique est égale à l'HR que doit avoir le milieu ambiant.

❖ **L'Humidité Absolue (HA)**

Le rapport entre la quantité d'eau vapeur (m_e) et la quantité d'air sec (m_a) caractérise l'humidité absolue exprimée en kg d'eau vapeur / kg d'air sec.

$$HA = \frac{m_e}{m_a} \quad \text{Équation 6}$$

❖ **Les Température sèche et Température humide**

La température sèche (T_s) correspond à la température indiquée par une sonde de température nue placée dans le courant d'air, tandis que la Température humide (T_h) est celle fournie par un thermomètre dont le bulbe est couvert par un matériau poreux imbibé d'eau pure. Elles sont reliées à l'HR de l'air par :

$$T_s - T_h = HR \quad \text{Équation 7}$$

❖ **L'enthalpie de l'air humide (Diagramme de Mollier)**

Le contenu énergétique d'un kg d'air sec contenant HA kg d'eau à 0°C, défini par son enthalpie (H), correspond à la quantité de chaleur à fournir sous pression constante pour l'élever de la température de référence (avec comme états de référence eau liquide et gaz sec à 0°C) à la température T°C.

$$H = cp_a T + HA L_{vap} + HA cp_e T \quad \text{Équation 8}$$

(1) (2) (3)

(1) : l'énergie nécessaire pour amener 1kg d'air sec de 0°C à T°C ;

(2) : l'énergie nécessaire pour évaporer HA kg d'eau à 0°C ;

(3) : l'énergie nécessaire pour chauffer HA kg d'eau de 0°C à T°C.

Avec Cp_a (1,01 kJ kg⁻¹°C⁻¹) et cp_e (1,93 kJ kg⁻¹°C⁻¹) correspondant respectivement aux chaleurs spécifiques de l'air et de l'eau et L_{vap} (2494 kJ kg⁻¹) à la chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C.

Le diagramme de Mollier (Annexe D) établi en superposant les courbes à enthalpie constante (isenthalpe), à température constante (isotherme) et à HR constante permet de déterminer les

caractéristiques thermodynamiques de l'air humide et de réaliser les calculs énergétiques pour le séchage.

❖ L'isotherme de sorption du produit

L'isotherme de sorption correspond à la corrélation entre l'activité de l'eau et la teneur en eau du produit. L'isotherme de sorption établi à une température donnée comprend la courbe d'adsorption et celle de désorption. Un exemple d'isotherme de sorption est présenté sur est la Figure 7.

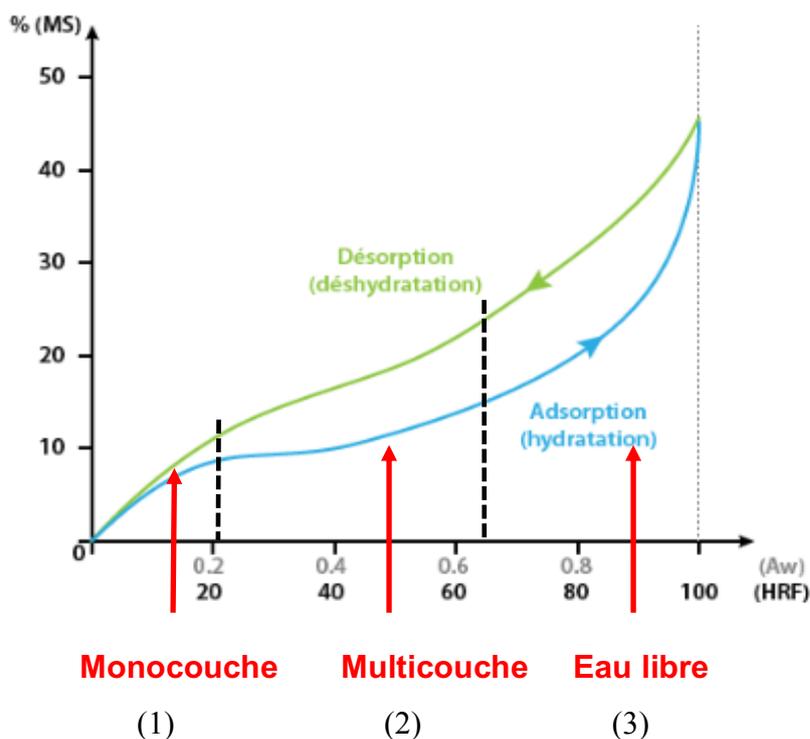


Figure 7 : Exemple d'isotherme de sorption.

Légende : Zone 1 : forces de Van der Waals (état rigide l'eau) ; Zone 2 : eau dans un état intermédiaire solide / liquide et Zone 3 : eau liquide.

Le décalage entre les courbes d'adsorption et de désorption, appelé phénomène d'hystérésis, s'explique par le fait que les pores dans les aliments se vident plus rapidement qu'elles ne se remplissent. Ce phénomène est d'autant plus marqué pour les fruits et légumes riches en sucre favorables à la formation de solutions sursaturées ne précipitant pas lors de leur déshydratation. Les isothermes de sorption présentent trois intérêts majeurs en industrie agroalimentaire, à savoir :

- ❖ sur le plan thermodynamique, l'obtention d'informations sur les enthalpies de sorption et les types de liaison de l'eau ;
- ❖ d'un point de vue structural, une meilleure compréhension de l'importance de la taille des particules et de la surface spécifique d'échange dans les phénomènes de sorption ;

❖ sur le plan technologique, un meilleur contrôle du séchage en permettant de calculer la teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) du produit avec l'air de séchage qui est la limite vers laquelle va tendre la teneur en eau (X) du produit à la fin du séchage [17], [67].

I.3.2.3 CINÉTIQUE DE SÉCHAGE ET BILANS DE TRANSFERT

I.3.2.3.1 CINÉTIQUE DE SÉCHAGE

La description du comportement d'un produit alimentaire lors du séchage par entraînement se fait par le biais des deux courbes qui suivent :

❖ la teneur en eau moyenne (X) du produit sur la base matière sèche en fonction du temps. Elle est obtenue par le suivi direct de l'évolution de la masse au cours du temps :

$$X = f(t) \quad \text{Équation 9}$$

❖ la vitesse de séchage du produit alimentaire en fonction de la teneur en eau moyenne sur la base matière sèche :

$$-dX/dt = f(X) \quad \text{Équation 10}$$

La **Figure 8** présente les courbes théoriques caractéristiques du séchage par entraînement.

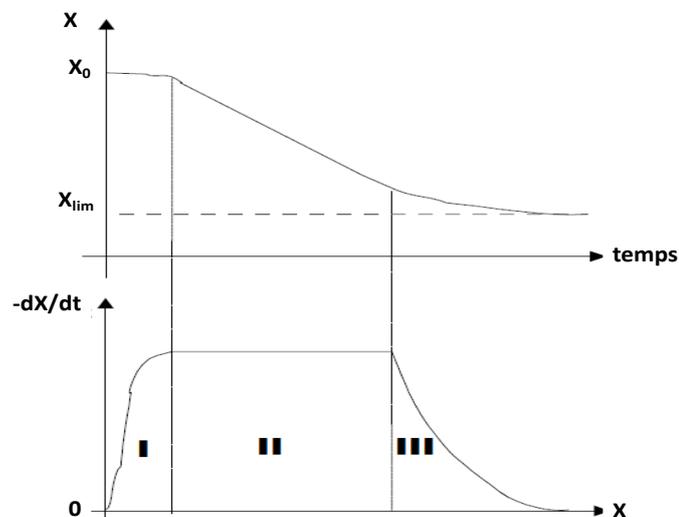


Figure 8 : Courbes théoriques du séchage par entraînement.

Trois phases se distinguent sur les courbes théoriques de séchage de produits non hygroscopiques peu déformables telles que la cellulose et l'argile entre autres. Ces trois phases sont les suivantes :

❖ une période de mise en température du produit, laquelle est quasi inexistante lorsque le produit est finement fragmenté;

❖ une phase à vitesse constante dite **période isenthalpique** (enthalpie constante) où l'eau libre est évaporée sans échange de chaleur avec l'extérieur, excepté pour les températures trop

élevées de l'air. Pendant cette phase, la **température du produit reste constante et est égale à la température humide de l'air**. Selon la porosité des produits alimentaires, cette période peut ne pas exister [18], [68]–[70] ;

❖ une étape à vitesse décroissante pendant laquelle l'eau de plus en plus liée s'évapore expliquant ainsi la diminution du débit d'eau évaporée. Une augmentation de la température de surface du produit vers la température sèche de l'air est observée parallèlement à une diminution de la teneur en eau du produit sur la base matière sèche jusqu'à une valeur limite (X_{lim}). Cette dernière varie en fonction de la température et l'humidité relative du fluide caloporteur [15], [18], [71].

I.3.2.3.2 BILANS DE TRANSFERTS DE CHALEUR ET DE MATIERE

Au cours du séchage par entraînement, quatre flux de transferts sont observés dont deux se déroulent à l'extérieur du produit et les deux autres à l'intérieur [52], [60], [72]. Les bilans globaux (*Figure 9*) s'écrivent sur la base des hypothèses de travail tels que :

- ❖ les transferts à travers les claies et les plateaux de séchage sont négligés ;
- ❖ la température et la teneur en eau sont uniformes à l'intérieur du produit ;
- ❖ les variations temporelles de la température à l'intérieur du produit et la déformation du produit sont négligeables ;
- ❖ la variation de température de l'air de séchage est négligeable ;
- ❖ et les flux d'air et de matière sont constants.

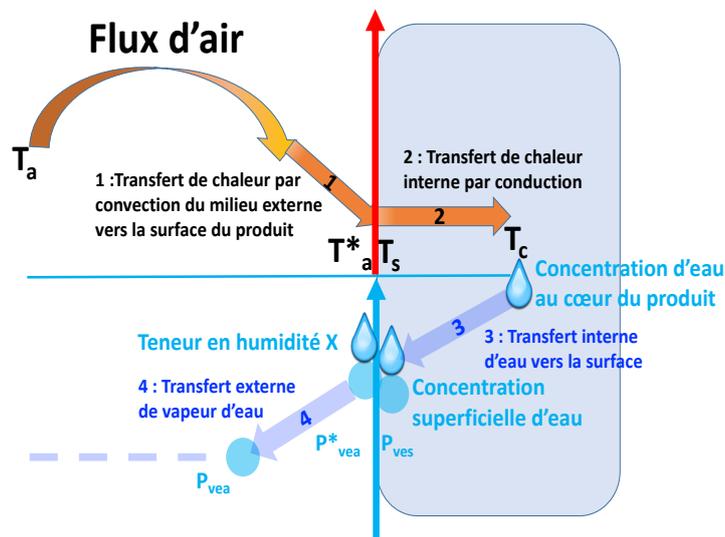


Figure 9 : Les différents flux de chaleur et de matière lors du séchage par convection d'air.

Légende : T_a : température du flux d'air, T_a^* : température de l'air au contact du produit, T_s : température de surface du produit, T_c : température au cœur du produit, P_{ves} : pression de vapeur d'eau en surface du produit, P_{vea}^* : pression partielle de vapeur d'eau de l'air au contact du produit, P_{vea} : pression partielle de vapeur dans le flux d'air.

L'air au contact de la surface d'échange du produit forme une mince couche dont l'épaisseur diminue avec l'augmentation de la vitesse de l'air de séchage. Au sein de cette couche limite, l'écoulement de l'air est considéré comme laminaire et immobile, donc en équilibre de température et d'humidité avec la surface du produit. Les quatre flux observés sont catégorisés en deux groupes :

❖ **Les transferts externes de chaleur et de matière**

Ils comprennent le transfert de chaleur du milieu extérieur vers le produit (1) et le transfert de vapeur de la surface du produit vers le milieu ambiant (4). La zone d'évaporation dite « **Front de Séchage** » (FS) se situe à la surface du produit. Les débits caractéristiques de ces transferts sont :

➤ **Débit de chaleur** transférée de l'air à la surface du produit (W)

$$\dot{Q}_{ext} = S h (T_a - T_a^*) \quad \text{Équation 11}$$

➤ **Débit massique de matière** (kg d'eau s⁻¹)

$$\dot{m} = S k (P_{vea}^* - P_{vea}) \quad \text{Équation 12}$$

Avec S : surface d'échange (m²), T_a : température du flux d'air de séchage (K), T_a^{*} : température de l'air au contact du produit (K), k : coefficient de transfert de matière (kg m⁻² s⁻¹Pa⁻¹), P_{vea}^{*} : pression partielle de la vapeur d'eau de l'air au contact du produit, P_{vea} : pression partielle de la vapeur d'eau du flux d'air de séchage (Pa), h : coefficient de transfert de chaleur par convection (W m⁻² K⁻¹) calculé à partir du nombre adimensionnel de Nusselt (Nu) lequel est fonction du nombre de Grashof (Gr) et de Prandtl (Pr) en convection naturelle [60], [73]–[76].

$$Nu = \frac{h e}{\lambda} = C (G_r P_r)^n \quad \text{Équation 13}$$

Avec e, l'épaisseur de l'échantillon, λ (Wm⁻¹K⁻¹), la conductivité thermique de l'air et n = ¼ en flux laminaire.

$$G_r = \frac{e^3 \rho_a^2 g \beta (T_a - T_a^*)}{\eta_a^2} \quad \text{Équation 14}$$

Avec η_a et ρ_a, respectivement la viscosité dynamique et la masse volumique de l'air ; β, le coefficient de dilatation volumique de l'air à pression constante, égal à

$$\beta = \frac{1}{T_{ref}} \quad \text{Équation 15}$$

$$P_r = \frac{\nu}{\alpha} \quad \text{Équation 16}$$

Avec ν et α respectivement la viscosité cinématique et la diffusivité thermique du fluide.

À l'équilibre du système :

$$\dot{Q}_{ext} = \dot{m} L_v \quad \text{Équation 17}$$

$$T_a^* = T_a - \frac{K L_v}{h} (P_{vea}^* - P_{vea}) \quad \text{Équation 18}$$

Avec L_v : la chaleur latente de vaporisation de l'eau à la température T_a^* (Température humide de l'air) égale à T_s , K : le coefficient de transfert de matière ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$) [15].

❖ Les transferts internes de chaleur et de matière

Ils regroupent le transfert de chaleur au sein même du produit (2) et le transfert d'eau sous forme liquide et / ou vapeur du produit vers sa surface d'échange (3). Les mécanismes du déplacement de l'eau de l'intérieur vers la surface sont complexes et le **front de séchage se situe à l'intérieur du produit**.

➤ Débit de chaleur

Intensifié par l'évapo-condensation de l'eau dans les milieux poreux, il est gouverné principalement par le gradient de température et dépend de la conductibilité de la matière.

En supposant que la conductibilité thermique est constante, l'équation globale de transfert de chaleur par conduction s'écrit :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{eff} \nabla(\nabla T) = \lambda_{eff} \frac{d^2 T}{dx^2} = \lambda_{eff} \Delta(T) \quad \text{Équation 19}$$

Ce débit de chaleur s'écrit selon la loi de Fourier.

$$\dot{Q}_{int} = \frac{1}{dS} \frac{dQ}{dt} = -\lambda_{eff} \frac{dT}{dx} \quad \text{Équation 20}$$

Avec ρ la masse volumique de l'oignon (kg m^{-3}) ;

C_p : chaleur massique de l'oignon ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) ;

T_s : température à la surface en (K) ;

T_c : température au cœur du produit en (K) ;

λ_{eff} : conductibilité thermique globale ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) ;

Q : l'énergie en J.

La conductibilité thermique globale est liée au coefficient de transfert de chaleur effectif global $k_{c\,eff}$ par la relation ci-après :

$$k_{c\,eff} = \frac{\lambda_{eff}}{e} \quad \text{Équation 21}$$

Avec e : l'épaisseur de la couche laminaire.

➤ Débit de matière

La diffusion est le mécanisme majeur responsable de la migration de l'eau sous forme liquide ou vapeur de l'intérieur du produit vers la surface. Ce mécanisme est régi par la seconde loi de Fick.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 X = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad \text{Équation 22}$$

Avec D_{eff} en $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, la diffusivité effective du produit, laquelle dépend de la température, de la teneur en eau du produit et de sa forme.

L'existence de multiples phases avec des phénomènes de transferts variables et complexes d'une phase à une autre rend l'étude de ce procédé de conservation très difficile. Le recours à la modélisation mathématique permet de simplifier ces mécanismes complexes par une approche macroscopique et de faciliter ainsi l'analyse de la cinétique de séchage pour assurer une maîtrise du procédé et préserver la qualité des produits séchés. Les modèles appliqués dans le cadre de notre étude sont présentés dans le chapitre *II.6.2.2*.

En résumé, la technique d'élimination de l'eau, clef pour améliorer la chaîne de valeur de la filière oignon et arrêter les importations, consomme beaucoup d'énergie et ne protège pas l'environnement. Dans les pays développés, quel que soit le secteur industriel, le séchage utilise 10 à 20 % de la consommation énergétique totale [77]. Parmi ces techniques, le mode de séchage par convection est la moins énergivore, mais reste néanmoins coûteux selon la source d'énergie utilisée pour disposer de l'air chaud. Ce constat incite les industriels à une recherche perpétuelle d'alternative telle que l'énergie solaire pour réduire le coût énergétique tout en préservant la qualité des produits.

I.3.3 ÉVALUATION DU POTENTIEL DE GISEMENT SOLAIRE DU SÉNÉGAL

L'énergie solaire existe sous différentes formes à savoir les combustibles fossiles, la biomasse, le photovoltaïque et le solaire thermique. Dans cette évaluation, un focus est fait sur la dernière qui consiste en une conversion directe de l'énergie solaire en chaleur utilisable pour différentes applications domestiques et industrielles. La majorité des données pour cette évaluation sont collectées au niveau de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM).

I.3.3.1 FLUX SOLAIRE

Le Sénégal, de par sa position géographique, dispose d'un potentiel de gisement solaire régulier avec un flux solaire (*Figure 10*) décroissant du nord au sud compris entre 6,8 KWh/m²/j à Dakar et 4,3 KWh/m²/j en Casamance [78].

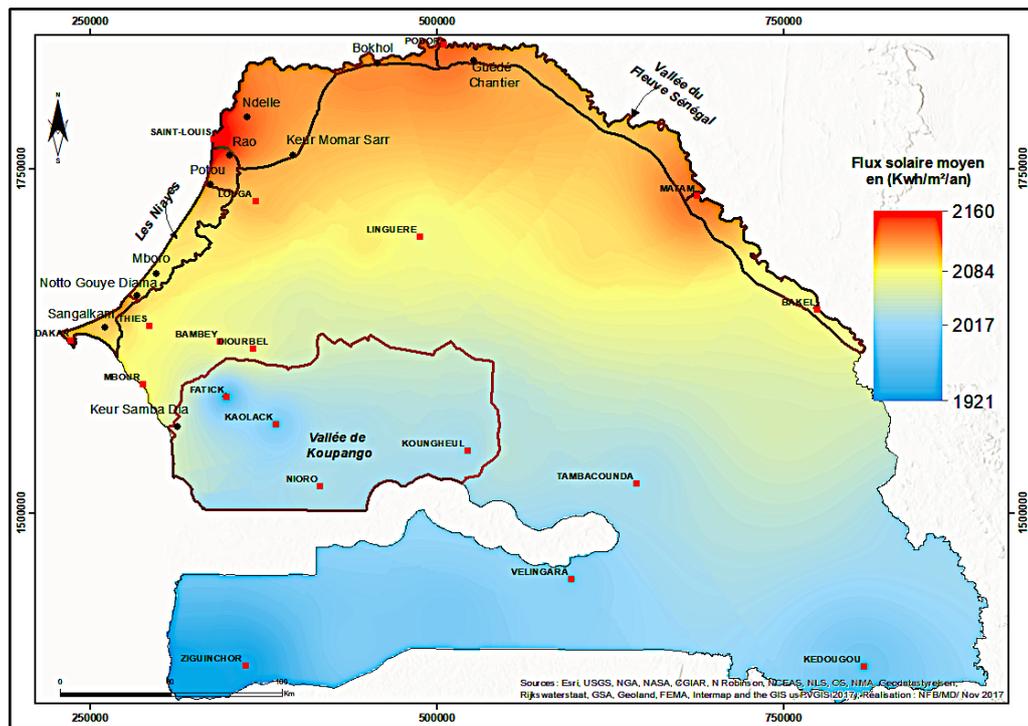


Figure 10 : Flux solaire moyen annuel au Sénégal.

La carte de flux solaire moyen annuel du Sénégal (**Figure 10**) reflète que la majorité des zones de production d'oignon se situe dans la partie nord du Sénégal où les flux solaires sont plus intenses, avec notamment un flux solaire moyen annuel compris entre 2080 et 2160 KWh /m² dans les deux grands pôles de production d'oignon [les Niayes et la Vallée du Fleuve Sénégal (VFS)] et un flux de l'ordre 2000 KWh /m² dans la vallée de Koupango où la production est naissante. Ce potentiel constitue un atout certain dans la réduction de la facture énergétique, frein majeur à la valorisation des produits agricoles locaux. Toutefois, il est essentiel d'analyser les durées d'ensoleillement en faisant la jonction avec les pics de production afin de mettre au point des procédés efficaces que l'ensemble des acteurs de la filière puissent s'approprier.

I.3.3.2 CARTOGRAPHIE DE L'ENSOLEILLEMENT

Le Sénégal, situé entre 12,5° et 16,5° de latitude nord, et 12° et 17° de longitude ouest, fait partie des pays les plus ensoleillés avec une durée moyenne d'insolation de l'ordre de 3000 heures par an. Selon les zones, l'insolation moyenne mensuelle (**Figure 11**) est comprise entre 200 et 260 heures avec une tendance vers la limite supérieure pour la majorité des localités.

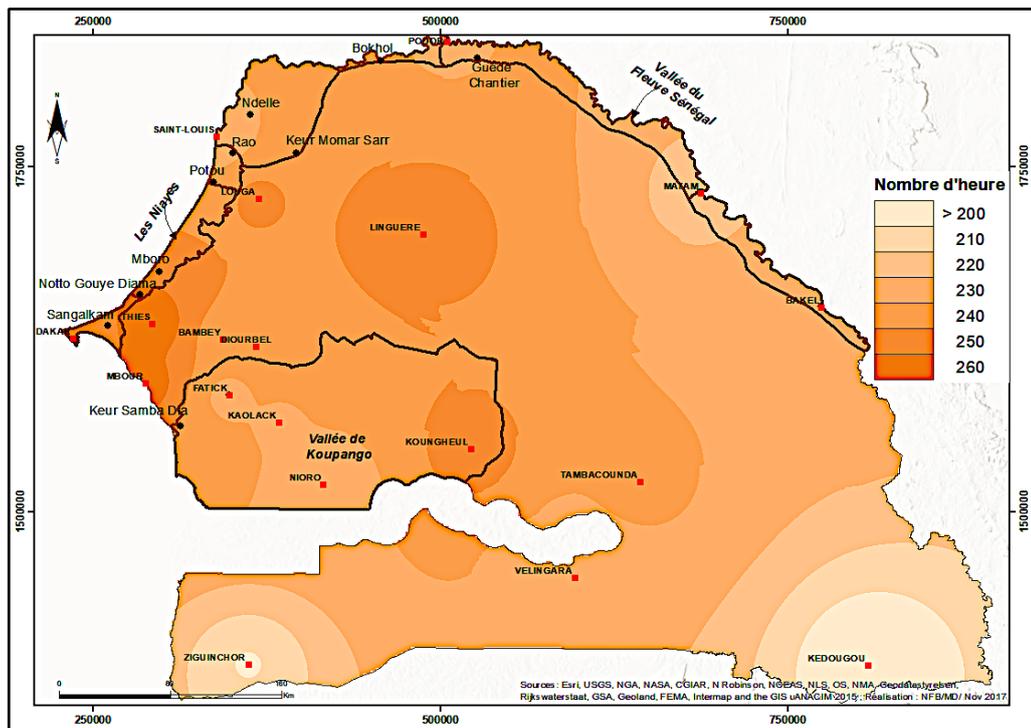


Figure 11 : Nombre d'heures d'ensoleillement par localités au Sénégal.

Cette cartographie montre que les principales localités de production d'oignon (VFS, Niayes, et Vallée de Koupango) au Sénégal se situent dans les régions de forte insolation (> 230 h / mois). Par ailleurs, la durée d'ensoleillement journalière varie de 7 à 10h selon la période de l'année et la localité [79]. Sur les dix dernières années la répartition est de 8 à 10h de janvier à juin, 6 à 8h de juillet à septembre, 8h à 9h d'octobre à décembre. Les **Figure 12** et **Figure 13** présentent respectivement l'évolution de l'insolation moyenne journalière et celle du flux solaire moyen journalier des principales régions situées dans les grandes zones de production d'oignon.

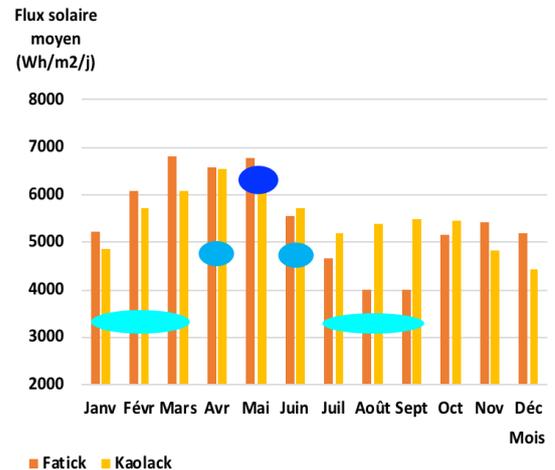
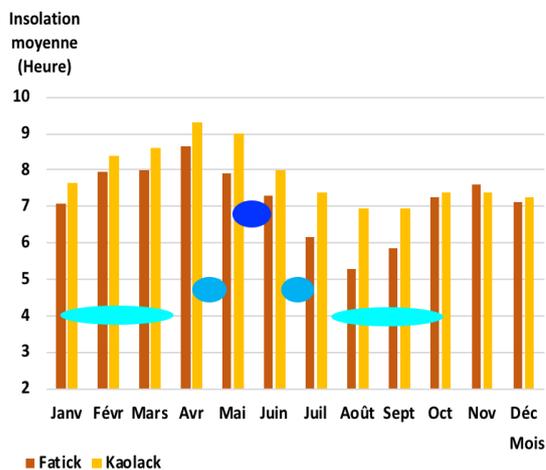
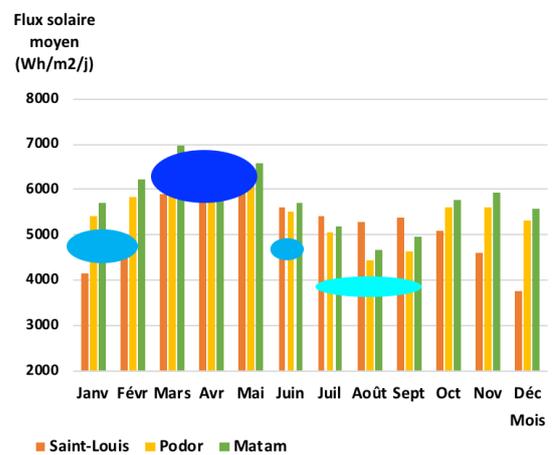
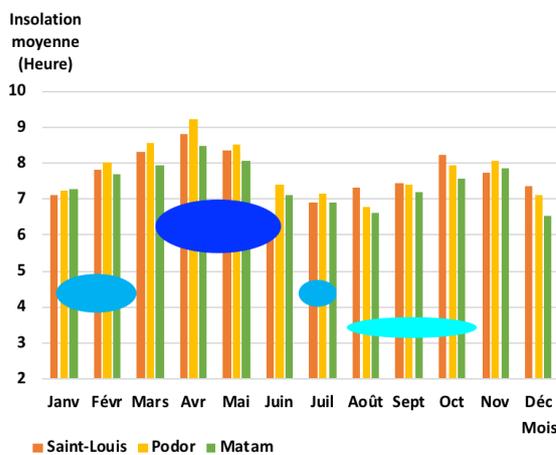
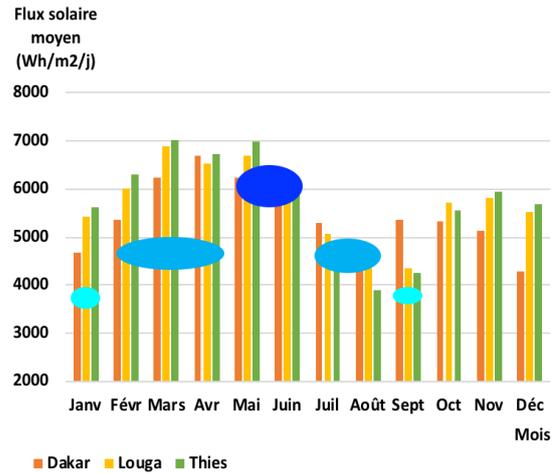
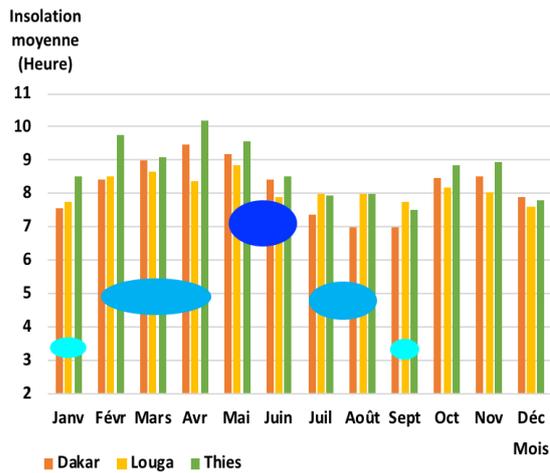


Figure 12: Évolution de l'insolation des principales régions situées dans les grandes zones de production d'oignon.

Figure 13: Évolution du flux solaire des principales régions situées dans les grandes zones de production d'oignon.

Forte production

Moyenne production

Faible production

La **Figure 12** versus la **Figure 13** montre que le flux solaire disponible augmente avec la durée effective de l'insolation. Aussi bien l'insolation que le flux solaire augmentent à partir du mois

de février pour atteindre des maxima durant la période d'avril à mai. Les valeurs décroissent à partir du mois de juin et les minima sont atteints sur la période de juillet à septembre.

Toutefois, cette disponibilité de l'énergie dépend également d'autres caractéristiques climatologiques telles que la température et la vitesse du vent (plus elles sont élevées, plus l'énergie disponible est meilleure), la nébulosité et l'humidité relative (plus elles sont basses, meilleure est l'énergie disponible). D'après les données climatologiques recueillies au niveau de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM), la température augmentant à partir de février pour atteindre les pics de maxima durant la période d'avril à juin (*Annexe E*), les conditions climatiques sont alors idéales pour le séchage solaire pendant la saison sèche qui s'étend de novembre à mai avec des optima en avril et mai et des minima durant le trimestre juillet, août et septembre. Les périodes de production d'oignon dans la VFS, les Niayes et la Vallée de Koupango, positionnées sur les *Figure 12* et *Figure 13* montrent que la production se déroule durant le cycle climatologique favorable au séchage solaire et les pics de production correspondent aux optima de conditions climatiques. Par ailleurs, l'analyse du calendrier de disponibilité (*Annexe F*) des fruits (banane, melon, papaye...) et légumes (piment, gombo, tomate, poivron, patate douce, choux, carotte aubergine...) frais au Sénégal reflète que les forts pics de production se situent également dans ces périodes de fort ensoleillement (janvier à mai et septembre à décembre). L'optimisation d'un séchoir solaire présente ainsi un grand intérêt pour la valorisation des surplus de production et l'amélioration de la disponibilité des produits toute saison.

I.3.4 ÉTAT DE L'ART SUR LES SÉCHOIRS SOLAIRES ET LEURS UTILISATIONS

Nos ancêtres ont toujours utilisé le séchage pour la conservation des aliments. Toutefois, les produits exposés directement au soleil ne sont protégés ni contre la poussière ni contre les contaminations microbiennes. De surcroît, les qualités organoleptiques des produits sont le plus souvent altérées car les populations n'exercent aucun contrôle sur les caractéristiques techniques et les conditions de séchage [15], [17].

I.3.4.1 TYPES DE SÉCHOIRS SOLAIRES

Différents séchoirs solaires ont ainsi été développés pour pallier les insuffisances du séchage traditionnel à l'air libre et optimiser l'utilisation de l'énergie solaire. La conversion de l'énergie solaire en énergie thermique repose sur l'utilisation de capteur solaire. Ces capteurs, efficaces mais très coûteux, sont de type tubulaire sous vide sans vitrage (la température du fluide caloporteur ne dépasse pas 40°C) ou avec plan vitré (la température du fluide caloporteur peut atteindre 150 °C). Les capteurs solaires plan fonctionnant avec l'air comme fluide caloporteur

sont les plus utilisés dans la conception des séchoirs solaires. Le capteur solaire plan comprend [56], [65], [80] :

- ❖ la couverture transparente en verre ou en polycarbonate, laquelle améliore le rendement du capteur et permet d'obtenir des températures élevées ;
- ❖ l'isolant thermique en mousse polyuréthane, en laine de verre ou en bois, lequel réduit les pertes thermiques ;
- ❖ l'absorbeur, l'élément principal du capteur, lequel convertit en chaleur la plus grande partie possible du rayonnement solaire. L'absorbeur est soit en métal soit en matière plastique, peut être avec ou sans vitre et sélectif ou non. En pratique, un corps métallique de bonne conductibilité thermique tels que le cuivre, l'acier inoxydable ou l'aluminium sont utilisés (*Figure 14*).

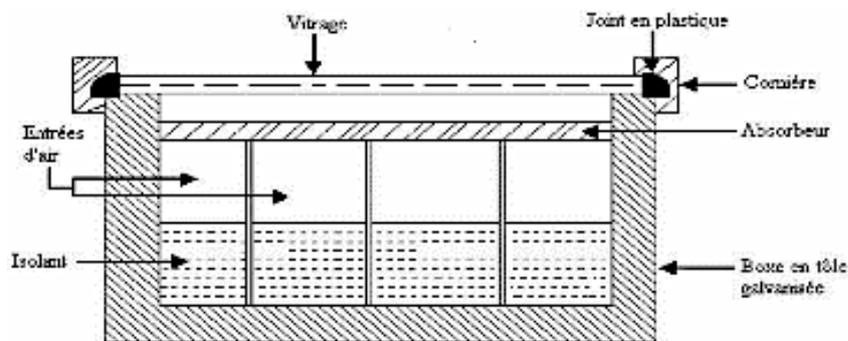


Figure 14 : Exemple de capteur solaire plan. Source : [65].

La partie des rayons solaires non convertie en chaleur, réémise dans l'infrarouge, est confinée entre la couverture transparente et l'absorbeur et permet d'augmenter la température de ce dernier par effet de serre. Par ailleurs, afin de limiter la déperdition d'énergie due à la lumière réfléchiée par la surface métallique de l'absorbeur, ce dernier subit un traitement de surface avec de la peinture noire ou de l'oxyde de chrome ou par dépôt de métaux sous vide. Ce traitement protège l'absorbeur, sert d'isolant thermique et permet de canaliser sur l'absorbeur l'air qui entre froid dans le capteur et doit en sortir chaud. La circulation de l'air dans les séchoirs solaires s'effectue soit en mode convection naturelle soit en mode convection forcée (*Figure 15*).

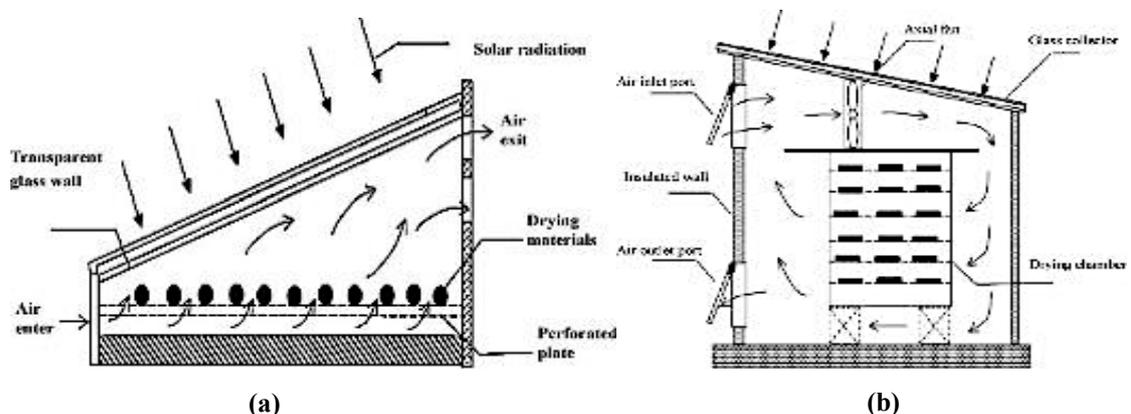


Figure 15 : Mode de circulation de l'air par convection naturelle (a) et par convection forcée (b) dans les séchoirs solaires. Source : [81].

En convection naturelle, la circulation d'air se fait par effet de cheminée dû au réchauffement ou par action du vent au niveau des points d'aération tandis qu'en convection forcée, la circulation d'air s'effectue par action mécanique.

La méthode de conversion de l'énergie solaire en énergie thermique utile pour le séchage et l'utilisation d'autres sources d'énergie permettent de classer les séchoirs solaires en quatre types [56], [80], [82], [83] :

❖ **Séchoirs solaires directs :**

Une seule pièce sert de collecteur solaire et de chambre de séchage (forme tente, dôme ou boîte). Les produits sont directement exposés au rayonnement solaire au travers d'une vitre ou d'un film plastique. Ces derniers sont transparents au rayonnement visible et opaques au rayonnement infrarouge. Parmi ces séchoirs solaires directs, peuvent être cités principalement les modèles de Sharma (développé en Inde dans les années 1970) et de Prestemon (mis au point aux États-Unis dans les années 1980) utilisés pour le séchage du bois et les modèles de séchoir tunnel de Hohenheim et Twaalf Ambachten pour les produits alimentaires.

❖ **Séchoirs solaires indirects**

Ces séchoirs sont constitués d'une chambre de séchage et d'un collecteur muni d'un capteur solaire qui assure la conversion des rayons solaires en chaleur permettant de chauffer l'air. (*Tableau IV*). Ce type de séchoir est surtout utilisé pour répondre aux besoins familiaux. L'air, chauffé au niveau du collecteur solaire, circule dans l'enceinte de séchage où sont disposés les produits à sécher sur des claies. Les produits ne sont donc pas directement exposés aux rayons solaires et la circulation de l'air est facilitée par l'inclinaison du collecteur et/ou un effet cheminée. Les modèles de séchoirs indirects répertoriés sont ceux de Simpson (séchage du bois aux Philippines dans les années 1980), de Lomley et Choong (USA dans les années 1980) et d'Icaro avec ses panneaux photovoltaïques le rendant ainsi entièrement autosuffisante en énergie [84].

❖ **Séchoirs solaires mixtes**

L'énergie utile au séchage des produits est fournie par les rayons solaires convertis par le collecteur solaire mais également par ceux absorbés directement au travers de la chambre de séchage (*Tableau IV*). L'action directe (flux solaire) et l'action indirecte (air préchauffé) du rayonnement solaire sont alors combinées pour le séchage des produits.

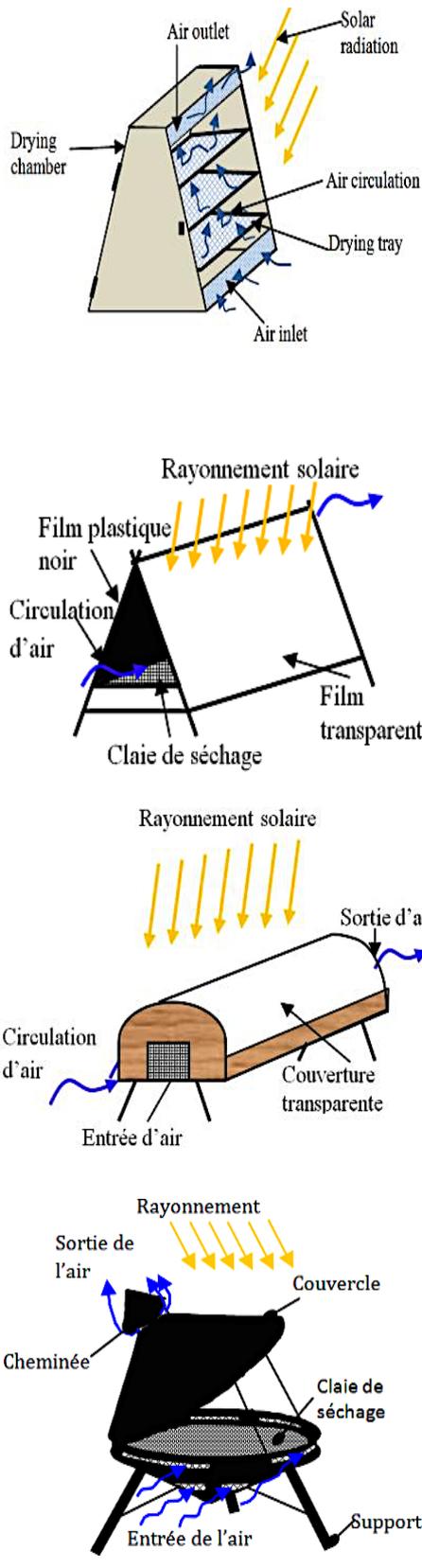
❖ **Séchoirs solaires hybrides**

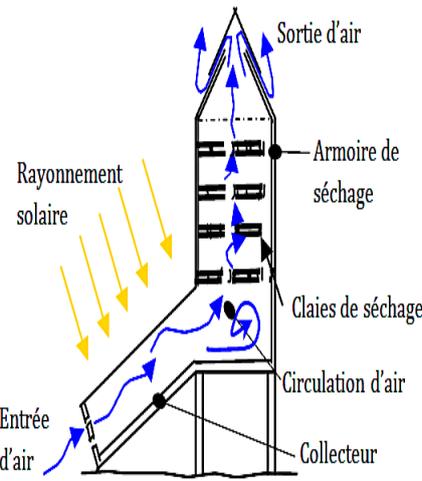
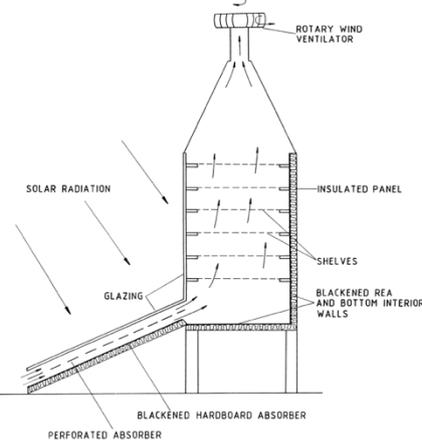
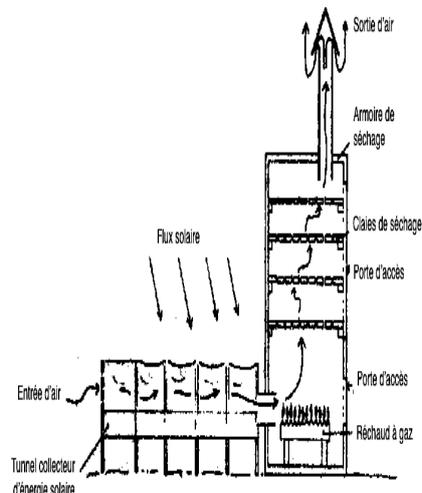
Afin de s'affranchir des variations climatologiques, le gaz, le bois ou le fuel sont utilisés comme seconde source d'énergie dans les séchoirs solaires hybrides. La température peut alors être maintenue constante dans ce type de séchoir et surtout le séchage peut s'effectuer sans interruption la nuit et indépendamment des mauvaises conditions climatiques. Peuvent être cités

comme exemple les séchoirs Maxicoq et Geho (séchoir Geho est une adaptation du séchoir tunnel) mis au point par l'université de Hohenheim dans les années 1990 pour lesquels le gaz constitue la seconde source d'énergie avec respectivement un mode de circulation de l'air par convection naturelle et forcée [85]. Ces séchoirs sont diffusés et testés en Afrique de l'Ouest, notamment au Bénin, avec les produits céréaliers et tubercules.

Les avantages et inconvénients de quelques exemples de de séchoirs sont répertoriés dans le *Tableau IV*.

Tableau IV : Avantages et inconvénients des différents types de séchoirs solaires.

Mode de séchage et exemple de séchoir	Avantage	Inconvénient
<p>Direct</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Protection contre nuisible et poussière ; • Main d'œuvre qualifiée pas nécessaire • Amélioration durée de séchage <i>versus</i> séchage à l'air libre • Pas d'exposition directe du produit au soleil (préserve couleur et vitamines) ; • Pas de source d'énergie supplémentaires 	<ul style="list-style-type: none"> • Surchauffe superficielle ; • Contrôle du taux de séchage difficile ; • Séchage non uniforme ; • Vitesse de séchage faible liée à la faible circulation de l'air (risque développement moisissures) ; • Perte qualité nutritionnelle et organoleptique • Durée de séchage variable selon les conditions météorologiques ; • Fragilité des couvertures

Mode de séchage et exemple de séchoir	Avantage	Inconvénient
<p>Indirect</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle température et teneur en eau de l'air asséchant ; • Réduction temps de séchage, • Amélioration qualité du produit • Meilleure préservation de la qualité du produit 	<ul style="list-style-type: none"> • Conception plus complexe que le séchoir direct ; • Tributaire des conditions climatiques
<p>Mixte</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration du taux de séchage 	
<p>Hybride</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la productivité (moins d'impact des conditions météorologiques) • Continuité du séchage (nuit et toute saison) • Contrôle du séchage 	<ul style="list-style-type: none"> • Investissement élevé ; • Maintenance ; • Personnel qualifié ; • Approvisionnement local en gaz, carburant et électricité ;

Source : [15], [56], [57], [65], [71], [80], [83].

Quel que soit le mode de séchage, les surfaces absorbant les rayons solaires sont orientées au sud avec un angle d'inclinaison pour un meilleur rendement de conversion et une meilleure circulation de l'air asséchant. Cet angle d'inclinaison est déterminé en fonction de la position moyenne du soleil. Par ailleurs, un système de stockage de l'énergie solaire peut être associé aux séchoirs afin de pallier les aléas climatiques et d'assurer la continuité du séchage [86].

I.3.4.2 CRITÈRES DÉTERMINANTS POUR LE CHOIX ET L'UTILISATION DES SÉCHOIRS SOLAIRES

Le choix du type de séchoir solaire dépend d'un certain nombre de critères prenant en compte les aspects techniques liés aux types de produits, à la conception du séchoir et à la mise en œuvre du séchage, les aspects financiers et le potentiel solaire. Les principaux critères sont catégorisés en quatre groupes [71], [77], [87] :

- ❖ les **caractéristiques initiales des produits** pour la spécification des conditions de séchage (relevant des propriétés thermo-physiques et thermodynamiques des produits à sécher) et des conditions de manutention (gouvernées par leurs propriétés mécaniques).

En effet, les propriétés biochimiques et physico-chimiques des produits sont très déterminantes sur le coefficient de diffusivité de l'eau du produit, donc sur son élimination. Parmi ces critères, peuvent être cités entre autres [15], [52], [71], [80], [88] :

- la forme et l'épaisseur du produit ;
- la teneur en eau du produit ;
- l'activité de l'eau, l'isotherme de sorption ;
- la sensibilité à la température ;
- la structure des parois cellulaires (leur résistance mécanique) qui freine la migration de l'eau vers la surface extérieure du produit ;
- la forte concentration des composés solubles (sucres, sels...) à la surface du produit.

- ❖ les **caractéristiques des séchoirs** pour garantir les performances thermiques (durée du séchage, capacité évaporatoire adéquate, consommation énergétique). Ces performances reposent en effet sur les matériaux de conception, le type, la taille et la forme des séchoirs définis en fonction des caractéristiques des produits et des quantités à sécher, mais également selon le potentiel de gisement solaire.

L'établissement des cinétiques de séchage permet d'évaluer les durées approximatives conditionnant surtout la taille lors de la conception des séchoirs.

- ❖ Les **caractéristiques relevant des conditions de séchage telles que** la température, l'humidité relative et la vitesse de l'air asséchant.

Les tableaux récapitulatifs (*Tableau V*, *Tableau VI* et *Tableau VII*) présentent quelques travaux de recherche montrant l'influence de ces paramètres clefs sur le séchage des produits végétaux.

Tableau V : Travaux montrant une influence de la température et de l'humidité relative de l'air sur la cinétique de séchage de quelques produits végétaux.

Produits	Teneur en eau (% bh)	Température (°C)	Humidité de l'air (%)	Référence
Tomate	90 à 95	50 ; 65 ; 75 65 ; 75 ; 85	20 ; 30 ; 40	[71] [16]
Citrouille	95,5	65 ; 75 ; 85	20 ; 30 ; 40	[16]
Carotte	89,4	65 ; 75 ; 85	20 ; 30 ; 40	[16]
Oignon	87,9 - 92,6	65 ; 75 ; 85	20 ; 30 ; 40	[16]
Céleri	88,3 – 96,5	20, 30, 40, 50 65 ; 75 ; 85	45, 30, 15, 10 20 ; 30 ; 40	[89] [16]
Pomme	80 - 90	35 - 55	10 – 30	[90]

Dans les conditions aérothermiques de ces travaux (Tableau VI), les résultats obtenus par ces différents auteurs montrent qu'une augmentation de la température de 10°C et une baisse de 20 % de l'humidité relative de l'air de séchage entraînent une réduction du temps de séchage, exception faite, par exemple, du céleri et de la citrouille pour lesquels les valeurs de l'humidité de l'air de séchage entre 20 % et 40 % ont une faible influence sur la cinétique de séchage.

Tableau VI : Travaux montrant une faible influence de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage de quelques produits végétaux.

Produits	Teneur en eau (%)	Vitesse (ms ⁻¹)	Référence
Poivron vert et oignon	85 - 92	3 ; 4 et 5	[91]
Légumes (citrouille, carotte, oignon, petits pois, céleri...)		1,5 ; 2,6	[16]
Pomme de terre	80 - 90	0,5 - 2,5	[92]
Betterave	87,2	2 - 6,5	[93]
Pomme	80 - 90	1 ; 2 ; 4,5	[94]

Dans le cas du séchage en couche mince et lorsque le séchage des produits s'effectue dans la phase à vitesse décroissante, les phénomènes limitants sont les transferts internes, lesquels rendent ainsi négligeables l'influence de la vitesse de l'air entre autres.

Tableau VII : Travaux montrant une influence de la vitesse de l'air sur la cinétique de séchage de quelques produits végétaux.

Produits	Teneur en eau (%)	1. Vitesse (m s ⁻¹)	2. Vitesse limite (m s ⁻¹)	Référence 1 et 2
Oignon	85 - 92	0,25 - 1	3	1 [95] 2 [91]
Carottes	80 - 90	0,5 - 1	1,14	1 [96] 2 [97]
Pomme de terre	80 - 90	0,5 - 2,5	2	1 [92] 2 [98]
Papaye	87,7	1,0 - 1,32		[99]
Bananes	74 - 80	0,3 - 0,7		[100]
Pomme	85 - 90	0,5 ; 1 ; 1,5		1 [101]

Légende : 1 : le temps de séchage diminue avec l'augmentation de la vitesse de l'air de séchage dans les intervalles donnés. 2 : L'augmentation de la vitesse de l'air de séchage au-delà de ces valeurs n'impacte pas le temps de séchage.

En résumé, les effets de la vitesse et de l'humidité relative de l'air de séchage sont moins accentués que ceux de la température sur l'ensemble des exemples cités. Toutefois à partir d'une diminution de 20 % de l'humidité relative, la perte en eau des produits est accélérée [16]. Quelques exemples de cinétiques de séchage montrant l'influence de ces différents paramètres sont présentés en *Annexe G*.

❖ **l'impact sur la qualité des produits** apprécié par les critères tels que l'humidité résiduelle, l'hygroscopicité du produit sec, le mode de conditionnement pour garantir la stabilité ainsi que la qualité nutritionnelle et organoleptique du produit sec.

En effet, une non maîtrise des transferts de chaleur et de matière entraîne d'importantes modifications sur les qualités nutritionnelles et organoleptiques des produits finis ne répondant pas forcément aux attentes des consommateurs. Ces effets sur la qualité des produits sont de plusieurs ordres :

- la perte en eau rapide des produits, surtout celle au début du séchage entraîne une forte concentration des composés solubles (sucres, sels...) à la surface du produit. Ceci crée un phénomène de croûtage dont les conséquences sont un ralentissement de la migration de l'eau (vitesse d'évaporation en surface supérieure à la vitesse de migration) et une altération de la qualité des produits ;
- l'élimination des composés volatiles, essentiellement les arômes lors de l'évaporation ;
- l'oxydation des lipides et des vitamines ;

- le brunissement enzymatique. La prévention contre ces brunissements se fait soit par inhibition des enzymes polyphénoloxydases, soit en réduisant la disponibilité de l'oxygène afin d'éviter l'oxydation des quinones. La richesse des oignons en composés soufrés (les sulfites sont des conservateurs utilisés comme antioxydant dans la conservation des fruits et légumes), laisse penser que ce type de brunissement n'est pas majoritairement responsable du changement de couleur de l'oignon lors du séchage. Cependant, il n'existe pas d'étude à ce sujet pour l'étayer ;
 - le brunissement non enzymatique dite réaction de Maillard faisant intervenir les Sucres Réducteurs (SR) et les groupements aminés des acides aminés des peptides ou de protéines. Ce brunissement, accéléré par l'augmentation de la température au cours du séchage, produit des arômes et des pigments caractéristiques désirables ou indésirables selon les aliments.
- Ces réactions de brunissement aussi bien enzymatiques que non enzymatiques sont responsables de la modification de couleur des aliments ;
- la dégradation de la vitamine C, sous l'effet de la température et en milieu acide, est également favorisée par la réaction de Maillard ;
 - la dénaturation des protéines liée à la baisse de la capacité de rétention d'eau ;
 - l'altération des propriétés physiques et mécaniques affectant la réhydratation lors de l'utilisation des produits séchés [52], [58], [68], [69], [71], [102].

Les investissements financiers, intrinsèquement liés à ces différents critères, deviennent relativement lourds selon la complexité de la conception (capteurs à angle d'inclinaison variable au cours du séchage afin de limiter l'impact de la variabilité de l'énergie, dispositifs de stockage d'énergie pour assurer la continuité du séchage). En dépit de cela, les séchoirs solaires sont plus économiques que les séchoirs électriques et sont largement utilisés pour la conservation des produits agricoles [56], [57], [71], [77], [103], [104]. Cependant, une évaluation des performances techniques avant toute réplification dans une zone est indispensable compte tenu de l'importance des critères liés aux produits et des conditions climatiques [81], [87], [105].

Au Sénégal, plusieurs types de séchoirs solaires ont été mis au point par le biais des Organisations Non Gouvernementales (ONG) telles que Groupe de Recherche et d'Échange Technologique / ENDA, Groupe Énergies Renouvelables et Environnement (GERES), Centre d'Étude et de Recherche sur les Énergies Renouvelables (CERE) pour le séchage solaire de poissons à Saint-Louis, Kayar et Bargny entre autres. De nettes améliorations sont observées quant à la protection contre les nuisibles et les impuretés. En dépit d'une technologie somme toute relativement simple, l'utilisation des séchoirs solaires n'est pas assez propagée. Le séchage solaire est plus utilisé pour les besoins familiaux par les coopératives et les groupements de femmes. La production est en

effet, souvent destinée à la consommation locale dans certains villages pour éviter les pertes post-récolte. Environ 170 séchoirs de type coquillage développés par le GERES sont diffusés au Sénégal depuis 1992. Sa réalisation s'effectue localement [85]. Les freins à la vulgarisation de cette technique de conservation pour l'amélioration de la chaîne de valeur agroalimentaire sont :

- ❖ le manque de formation entraînant une non-maîtrise du procédé de séchage. Par conséquent, la longue exposition des produits, due à une diminution lente de leur teneur en eau, altère leur qualité par la perte de nutriments et par le risque de développement de moisissures ;
- ❖ les utilisateurs ne s'approprient pas le matériel de séchage implanté par les ONG ;
- ❖ les difficultés de conditionnement entraînent une reprise d'humidité favorable au développement des moisissures au cours du stockage ;
- ❖ la consommation de produits séchés ne fait pas partie des habitudes alimentaires des Sénégalais ;
- ❖ les difficultés de commercialisation.

Toutefois, il existe une demande, notamment pour l'oignon en poudre, de la part des industriels producteurs de bouillons qui sont obligés d'en importer alors que localement les pertes post-récoltes sont de l'ordre de 5 % à 40 %, ainsi qu'au niveau des marchés urbains nationaux où les ménages sont de plus en plus demandeurs de produits prêts à l'emploi. La vulgarisation de cette technique représente un levier de développement économique et de lutte contre la pauvreté pour les agriculteurs à la recherche de revenus supplémentaires dans les zones rurales.

I.4 CONCLUSION

L'oignon, cultivé dans environ 175 pays dans le monde, est consommé cru ou cuit comme légume ou condiment (38 g / personnes / jour) et dispose de bonnes qualités nutritionnelles, organoleptiques et de multiples intérêts thérapeutiques. Toutefois, ces caractéristiques dépendent non seulement des variétés (environ plus de 1000 variétés répertoriées dans le monde) et des conditions de cultures mais également des modes d'utilisation.

Au Sénégal, où l'oignon est l'une des denrées de base (10 à 25 % des dépenses des ménages pour une consommation de 13 kg / personne / an), l'analyse situationnelle de la sous-filière oignon révèle que les efforts déployés en terme de politiques agricoles et de commercialisation ont atteint leurs objectifs avec une production d'oignon local de 393 225 tonnes en 2016, couvrant largement les besoins en consommation (150 000 et 250 000 tonnes). Malgré cette performance, les importations d'oignon situées à 140 000 tonnes en 2016 reflètent l'existence d'importantes pertes post-récoltes (5 % à 40 %) liées aux pratiques agricoles.

Par ailleurs, le manque de valorisation de la production locale d'oignon constituant un des freins majeurs à l'essor de la chaîne de valeur, nous a incités à orienter nos travaux de recherches sur le

volet relatif à la transformation. Cette absence de transformation des bulbes en poudre au niveau local, se justifie par deux raisons principales que sont la non-maîtrise des techniques de séchage respectant les conditions d'hygiène et par le coût très élevé du procédé (La consommation d'énergie, principale source d'émission de gaz à effet de serre, est le second poste de coût derrière les matières premières en agroalimentaire et le séchage en représente environ 10 % à 20 %). Les paramètres à maîtriser pour bien sécher et assurer la qualité des produits sont la qualité du produit frais à sécher (exempt de pourritures), l'apport en énergie, la capacité de l'air environnant à absorber l'eau éliminée du produit (difficulté de sécher en saison humide car air saturé), la vitesse de l'air au niveau du produit pour entraîner la vapeur d'eau (sécher vite pour éviter moisissures mais pas trop pour éviter croûtage) et la gestion du produit après séchage (conditionnement circuit de commercialisation). Afin d'améliorer les transferts de chaleur et de matière et de réduire la consommation énergétique, il est donc crucial de travailler avec des échantillons de petites épaisseurs (≤ 20 mm) et étalés en couche mince et de trouver des alternatives à l'énergie électrique.

Malgré son fort potentiel solaire ($6,8 \text{ KWh /m}^2 / \text{j}$), le bilan énergétique du Sénégal est dominé par la biomasse et les produits pétroliers. Il est alors essentiel de disposer d'informations sur les critères de choix (fournies par des expériences pratiques de séchage de variétés locales) et d'adapter la conception aux matériaux et aux besoins locaux pour une meilleure optimisation et une dissémination de cette technique. Par ailleurs, le meilleur rapport coût d'investissement et de fonctionnement assurant la stabilité tout en préservant les éléments nutritifs, les propriétés organoleptiques et l'environnement constituent la clef de voûte pour le choix du type de séchoir.

CHAPITRE II

APPLICATION DU SÉCHAGE AUX QUATRE VARIÉTÉS D'OIGNON

II.1 INTRODUCTION

La serre solaire, plus économique en termes d'investissements vu le contexte économique, est utilisée pour cette application du séchage à l'oignon. Par ailleurs, ce type de séchoir a permis d'obtenir des résultats satisfaisants avec certains produits alimentaire tels que le piment [87], le gombo, le manioc et la banane [106] et la groseille [107].

L'absence d'expériences pratiques de transformation sur les variétés d'oignon local, ressortie dans la synthèse bibliographique, justifie l'initiation de cette étude. Cette dernière vise à apporter des éléments de réponse sur les caractéristiques des oignons avant et après séchage, sur les performances thermiques et les isothermes de désorption déterminant pour la conception des séchoirs solaires et leur dissémination au niveau national et sous régional.

Dans le cadre du projet *Strengthening Africa's Strategic Agricultural Capacity for Impact on Development* (SASACID) des essais préliminaires de séchage solaire ont été réalisés avec des Groupements d'Intérêt Économique (GIE) situés à Bango dans la région de Saint-Louis. Ces essais ont porté sur les variétés Rouge d'espagnole, Yakar, Noflaye, Mercedes, Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.

À l'issue de ces essais préliminaires, les variétés donnant les meilleurs rendements notamment le Violet de Galmi, le Safari, le Gandiol F1 (Gandiolois) et l'Orient F1 (Orient) ont été retenues pour nos travaux de recherche.

Les différentes phases du protocole expérimental s'articulent autour de sept volets :

- ❖ la présentation du matériel végétal ;
- ❖ la caractérisation physico-chimique des quatre variétés d'oignon ;
- ❖ l'effet de la variété et de la température sur la cinétique de séchage à l'étuve ;
- ❖ la comparaison de la cinétique de séchage à l'étuve à la cinétique en serre solaire ;
- ❖ la modélisation de la cinétique de séchage et l'établissement des courbes caractéristiques de séchage ;
- ❖ la détermination des isothermes de désorption et de quelques propriétés thermodynamiques ainsi que la comparaison économique des deux modes de séchage ;
- ❖ la caractérisation physico-chimique des quatre variétés d'oignon séché.

II.2 PRÉSENTATION DU MATÉRIEL VÉGÉTAL

II.2.1 ORIGINE ET CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL VÉGÉTAL

Le matériel végétal utilisé est l'oignon local collecté au niveau de la coopérative dénommée « l'Union des Groupements de Producteurs Agricoles du secteur de Rao (UGPAR) ». Le groupement est situé dans la région Saint-Louis (Sénégal).



Figure 16 : Plantation d'oignons à Rao.

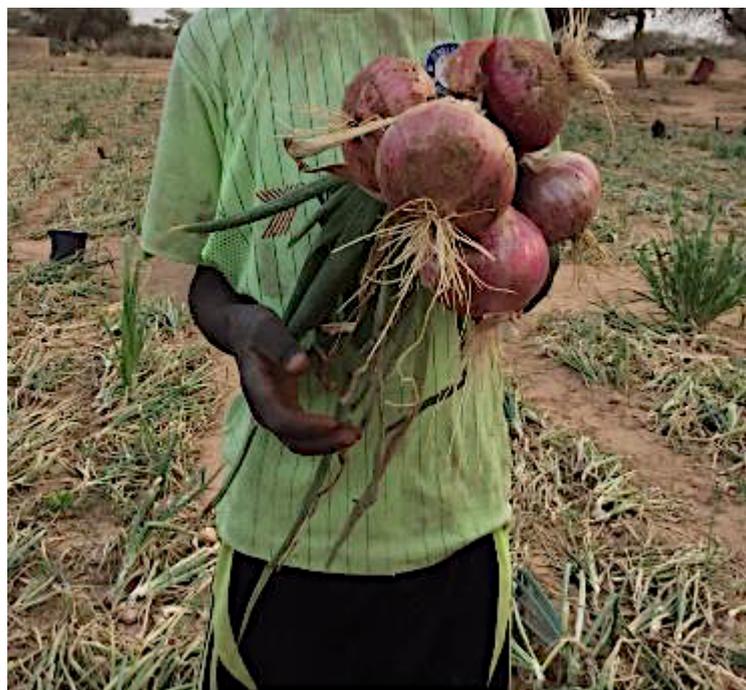


Figure 17 : Récolte d'oignons dans une plantation à Rao.

L'étude porte sur les variétés les plus cultivées au Sénégal, à savoir le Violet de Galmi, le Safari, le Gandiol F1 (Gandiolais) et l'Orient F1 (Orient) (DHORT, 2015). Les caractéristiques de ces variétés sont présentées dans le **Tableau VIII**.

Tableau VIII : Caractéristiques des bulbes des quatre variétés d'oignon.

Variété	Forme	Taille	Couleur écailles	Couleur Épiderme	Odeur et Goût	Conservation
VG	Elliptique aplatie	Moyenne	Rose	Violet	Très piquant	Très bonne
SF	Aplatie et épaisse	Moyenne	Violet	Violet	Très prononcée	*Longue
GN	Ob-ovoïde large	Moyenne	Rouge	Rouge-violet	Piquant	Très bonne
OR	nd	nd	nd	nd	nd	nd

Légende : Violet de Galmi (VG), Safari (SF), Gandiol F1 (GN), Orient F1 (OR), nd : non déterminé.

Source : Tropicasem, Centre pour le Développement de l'Horticulture et Catalogue semences de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles.

Les oignons sont collectés par sac de 20 kg et acheminés vers Dakar où ils sont stockés au laboratoire dans un endroit bien aéré pour limiter les pertes. La collecte directe auprès des producteurs permet d'éviter les croisements entre les variétés.

II.2.2 PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

Le procédé de séchage ne détruisant pas les microorganismes, les opérations de préparation visent à éliminer toutes pourritures et déchets et à nettoyer les échantillons de façon à limiter la charge microbienne. Par conséquent, les différentes opérations de préparation sont :

- ❖ le triage pour éliminer toutes les pourritures ;
- ❖ le lavage avec de l'eau chlorée à 100 ppm (0,1 mg / l d'eau), suivi de trois rinçages successifs avec de l'eau claire pour éliminer toute trace de chlore ;
- ❖ l'épluchage suivi d'un rinçage à l'eau claire afin d'éliminer toutes les épluchures ;
- ❖ l'essorage permet de bien éliminer toutes traces d'eau de rinçage ;
- ❖ le découpage pour faciliter et avoir un hachage homogène.

Cette dernière opération, réalisée avec un hachoir, permet d'obtenir des morceaux d'oignon extrêmement fins et facilite ainsi l'évaporation de l'eau au cours du séchage par augmentation de la surface d'échange.

II.2.3 DIAGRAMME DE PRODUCTION DE LA POUDRE D'OIGNON

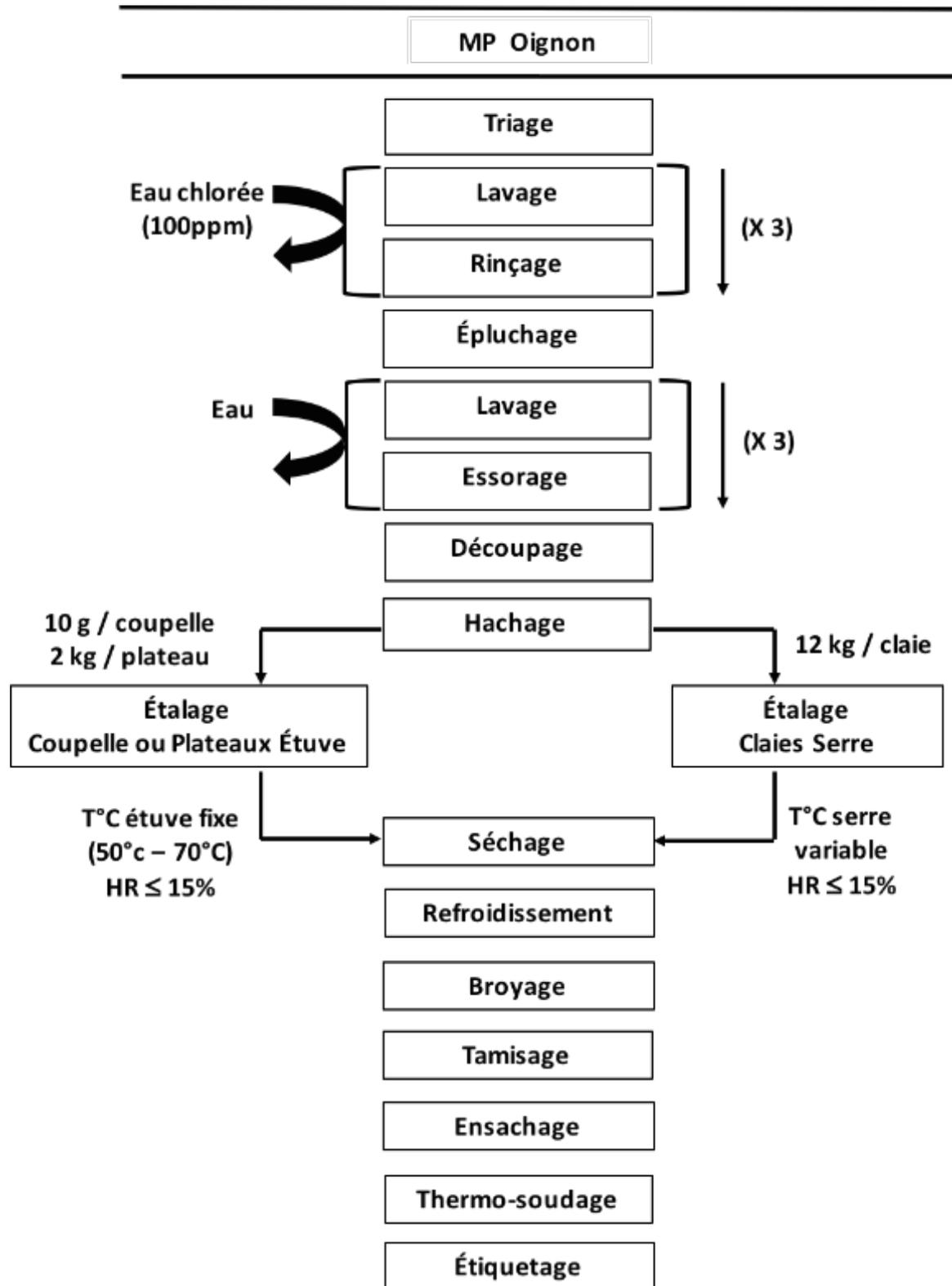


Figure 18 : Les différentes étapes de la production de poudre d'oignon par séchage à l'étuve et en serre solaire.

Le diamètre du tamis utilisé est de 800 microns. Les poudres d'oignon sont conditionnées par sachet de 20 g et conservées à température ambiante.

II.3 CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUES ET BIOCHIMIQUES DES QUATRE VARIÉTÉS D'OIGNON

La connaissance et la maîtrise des caractéristiques des produits à sécher sont des critères indispensables pour la mise en œuvre d'une technologie de séchage adéquate consommant le moins d'énergie et préservant l'ensemble des composantes qualité des produits prédisposés au séchage (Cf. *I.3.4.2*). À cet effet, les différentes caractéristiques déterminées sont la teneur en eau, l'activité de l'eau (A_w), les teneurs en protéines, en minéraux et en polyphénols, le taux de cendre, les Sucres Totaux (ST), les Sucres Réducteurs (SR), le potentiel Hydrogène (pH) et l'Acidité Titrable (AT).

II.3.1 MATÉRIELS D'ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES ET BIOCHIMIQUES

II.3.1.1 RÉACTIFS

L'eau distillée est utilisée pour la préparation des différentes solutions et la réalisation des dilutions nécessaires avant d'effectuer les mesures.

Les réactifs utilisés pour la caractérisation des quatre variétés d'oignon sont :

- ❖ de l'acide sulfurique, de la pastille de sélénium et sulfate de cuivre, de la soude 40 %, de l'acide borique, du rouge de méthyle, du Vert de bromocrésol, ainsi qu'une solution de soude 0.1 N pour l'extraction et la titration de l'azote dans le cadre de la détermination des protéines ;
- ❖ de l'acide chlorhydrique 1 N pour la solubilisation des minéraux contenus dans les cendres, de l'acide méthane-sulfonique 20 mmolaires comme solvant d'élution pour le dosage des minéraux ;
- ❖ du sulfate de cuivre pur, de l'acide citrique et du carbonate de sodium anhydre pour la préparation de la solution cupro alcaline, d'une solution d'iodure de potassium, de l'acide sulfurique et d'une solution de thiosulfate de sodium pour le dosage des ST et des SR ;
- ❖ de l'acide chlorhydrique, de la lessive de soude, de l'acétone / eau (70 / 30), du réactif de Folin, une solution de carbonate de sodium 75 g / l et de l'acide gallique pour le dosage des phénols.

Le tableau récapitulatif des réactifs utilisés précisant la pureté et l'origine est donné en *Annexe G*.

II.3.1.2 APPAREILLAGES

En plus de la verrerie de laboratoire, de la balance de précision, du vortex, du bain-marie, des dessiccateurs, de la plaque chauffante, les principaux appareils ayant permis d'effectuer les analyses sont :

- ❖ une étuve marque Memmert (précision de 0,1 °C) pour le séchage et la détermination de l'humidité ;
- ❖ un awmètre HYGROPALM-HP23-AW-A de marque Rotronic pour la détermination de l'activité de l'eau
- ❖ un minéralisateur ;
- ❖ un distillateur pour l'extraction de l'azote ammoniacal ;
- ❖ un four à moufle de marque Vulcan 3-550 pour la détermination des cendres, ;
- ❖ un chromatographe échangeur d'ion de marque Dionex Ion PAC™ CS12A pour la caractérisation des minéraux. Le chromatographe comprend une pré-colonne pour éliminer les impuretés, une colonne cationique, un injecteur, un supprimeur, une pompe, et un conductimètre ;
- ❖ un spectrophotomètre UV - visible de marque Specord pour le dosage des phénols ;
- ❖ un pH mètre avec une électrode de verre combinée (précision de 0,05 unité pH)
- ❖ une balance analytique (précision 0.0001 g).

II.3.2 MÉTHODES D'ANALYSES

II.3.2.1 DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN EAU

II.3.2.1.1 PRINCIPE ET MODE OPERATOIRE

La teneur en eau, proportion effective (totale, dosable) d'eau est mesurée selon la norme NF ISO 712 : 2009. La détermination se fait par perte de poids à la dessiccation entre 103 - 105 °C à l'étuve pendant 2 heures. Par cette méthode indirecte on dose toutes les matières volatiles à 105 °C selon le mode opératoire suivant :

- ❖ sécher un creuset par passage à l'étuve et refroidissement au dessiccateur jusqu'à la température du laboratoire puis taré ;
- ❖ prélever une masse 2,5 g de l'échantillon dans le creuset préalablement taré ;
- ❖ introduire le creuset ouvert contenant la prise d'essai dans l'étuve pendant 2 heures ;
- ❖ en opérant rapidement, retirer le creuset de l'étuve et le placer dans le dessiccateur ;
- ❖ peser dès que le creuset est refroidi, à la température du laboratoire, (30 minutes après).

II.3.2.1.2 EXPRESSION DES RESULTATS

La teneur en eau en pourcentage est égale à

$$\frac{100 * (M_0 - M_1)}{E}$$

Avec M_0 , M_1 et E respectivement les masses en gramme de la prise d'essai +tare avant séchage, de la prise d'essai + tare après séchage et de la prise d'essai.

II.3.2.2 DÉTERMINATION DE L'ACTIVITE DE L'EAU

L'activité de l'eau est déterminée selon la norme de référence NF EN ISO 17025.

Les échantillons broyés pour assurer une homogénéisation du produit sont déposés dans une coupelle. Cette dernière est introduite dans le réceptacle de l'aw-mètre HYGROPALM-HP23-AW-A. équipé d'une tête de mesure.

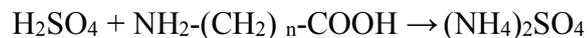
L'aw-mètre mesure ainsi l'humidité relative et la température et calcule directement l'activité de l'eau.

II.3.2.3 DOSAGE DES PROTÉINES

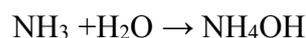
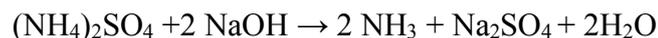
Dans le domaine des indications nutritionnelles, on se contente généralement de mesurer la teneur en protéines brutes laissant l'évaluation des proportions des acides aminés composant ces protéines au domaine diététique. Les protéines brutes sont déterminées selon la méthode Kjeldahl qui consiste à doser l'azote total et à multiplier la teneur en azote par un facteur conventionnel « F » ($N_{\text{total}} * F$) qui varie selon la nature de l'aliment.

II.3.2.3.1 PRINCIPE ET MODE OPERATOIRE

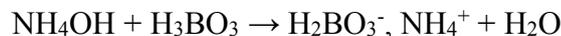
La matière organique est détruite par l'oxydation sous l'effet combiné de l'acide sulfurique et de catalyseurs à chaud. Dans ces conditions l'azote des groupements amines est transformé en sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$



Pendant la distillation, le déplacement de l'ion NH_4^+ se fait avec la lessive de soude. Ensuite l'ammoniac (NH_3) est complexé par la vapeur d'eau pour donner le composé NH_4OH .



L'hydroxyde d'ammonium (NH_4OH) est recueilli après condensation dans une solution d'acide borique fixatrice contenant déjà un indicateur mixte (rouge de méthyle + vert de bromothymol).



Enfin on procède au titrage du distillat ammoniacal et à l'expression de la teneur en azote.

Le mode opératoire est décrit ci-après :

⇒ Minéralisation

- ❖ peser à 1 mg près, 1 g de l'échantillon à analyser dans le ballon de minéralisation ;
- ❖ introduire une pastille (sélénium et sulfate de cuivre) pour catalyser la réaction puis ajouter peu à peu 15 ml H_2SO_4 pure et homogénéiser ;
- ❖ chauffer le ballon modérément, en agitant de temps en temps jusqu'à carbonisation de la masse et disparition de l'écume, ensuite plus intensément jusqu'à l'ébullition et enfin maintenir l'ébullition pendant 1 heure. Laisser refroidir.

⇒ Distillation de l'ammoniac

- ❖ le minéralisât est repris dans une fiole de 250 ml ;
- ❖ prendre une aliquote de 25 ml et la placer dans le tube de distillation ;
- ❖ ajouter 60 ml de soude 40 % pour neutraliser l'excès d'acide et rendre basique l'aliquote ;
- ❖ distiller et recueillir le distillat dans une fiole conique de 200 ml contenant au préalable 25 ml d'acide borique à 2 % et un indicateur mixte (en général on utilise le rouge de méthyle plus le vert de bromocrésol qui est rouge en milieu acide et vert en milieu basique).

⇒ Titration

L'ammoniac recueilli dans La fiole conique est dosé par de l'acide sulfurique 0,1 N. Soit un volume V versé.

II.3.2.3.2 EXPRESSION DES RESULTATS

La teneur en Azote (A) et la teneur en Protéine (P) sont exprimées en pourcentage de matières sèches.

$$protéines = \frac{0.1 * V * 14 * F}{P_E}$$

La teneur d'un aliment en protéine est par convention obtenue en multipliant la teneur en azote par le facteur approprié F. Ce dernier est de 5,70 pour les produits végétaux.

II.3.2.4 DÉTERMINATION DES MATIÈRES MINÉRALES

II.3.2.4.1 PRINCIPE ET MODE OPERATOIRE

La quantité de matières minérales des échantillons d'oignon est mesurée par méthode gravimétrique après incinération dans un four à 550 °C. La méthode appliquée fait référence à la norme européenne EN 1135 Décembre 1994 (indice de classement : V 76-124).

Le mode opératoire est :

- ❖ peser à 1 mg près 2 g de l'échantillon dans une nacelle préalablement séchée par passage à l'étuve et refroidissement au dessiccateur jusqu'à la température du laboratoire, puis tarer ;
- ❖ introduire la nacelle contenant la prise d'essai dans l'étuve à 550 °C pendant 3 heures ;
- ❖ en opérant rapidement, retirer la nacelle de l'étuve et la placer dans le dessiccateur ;
- ❖ dès que la nacelle est refroidie à la température du laboratoire, la peser à 1 mg près.

II.3.2.4.2 EXPRESSION DES RESULTATS

Le taux de cendre, exprimé en pourcentage en masse rapporté à la matière telle quelle est égale à :

$$\text{taux de cendre} = \frac{100 * (M_1 - M_0)}{P_E}$$

Avec M_1 , M_0 et P_E respectivement les masses en grammes du résidu + tare après incinération, de la tare avant incinération et de la prise d'essai.

II.3.2.5 DOSAGE DES MINÉRAUX

La caractérisation des minéraux se fait par chromatographie échange d'ions à partir des cendres obtenues lors de la détermination de la quantité totale de matières minérales.

II.3.2.5.1 PRINCIPE ET MODE OPERATOIRE

Les colonnes d'échange d'ions sont des résines insolubles portant des groupements chargés capables d'échanger réversiblement leurs ions avec les ions de la solution échantillon. Ces groupements sont soit négatifs (colonne cationique), soit positifs (colonne anionique). Un fois les ions de l'échantillon adsorbés sur la colonne, un solvant, contenant des ions de densité de charge et de concentration plus élevées, est utilisé pour la désorption. En comparant les temps de rétention à des solutions de référence, la nature des ions présents dans l'échantillon est déterminée. Le volume de solvant utilisé permet ainsi de déterminer la quantité. Dans le cadre de notre étude, une colonne cationique de type CS12 A est utilisée. Le mode opératoire est :

⇒ Préparation des échantillons

- ❖ peser à 1 mg près 2 g de l'échantillon dans une nacelle préalablement séchée par passage à l'étuve et refroidissement au dessiccateur jusqu'à la température du laboratoire, puis tarer ;
- ❖ introduire la nacelle contenant la prise d'essai dans l'étuve à 550 °C pendant 3 heures ;
- ❖ en opérant rapidement, retirer la nacelle de l'étuve et la placer dans le dessiccateur ;
- ❖ dès que la nacelle est refroidie à la température du laboratoire la peser à 1 mg près ;
- ❖ Ajouter 3 ml d'acide chloridrique 1 N dans la nacelle ;
- ❖ chauffer en remuant sur une plaque chauffante sous une hotte jusqu'à évaporation totale ;
- ❖ récupérer l'échantillon avec 2 fois 30 ml d'eau déminéralisée ;
- ❖ filtrer avec papier Whatman ;
- ❖ récupérer le filtrat dans une fiole de 100 ml et compléter jusqu'au trait de jauge avec de l'eau déminéralisée ;
- ❖ faire une dilution au 1/10^e.

⇒ Préparation du solvant d'élution

- ❖ acide méthane sulfonique 20 mM.

⇒ Préparation de la colonne pour les analyses

- ❖ purger pour éliminer les bulles d'air dans la colonne pendant 3 min ;
- ❖ conditionner la colonne pendant 30 min.

⇒ Dosage des minéraux

- ❖ injecter 25 µl des échantillons dilués au 1 / 10^e ;
- ❖ effectuer l'élution avec le solvant pendant 15 à 20 min.

II.3.2.5.2 EXPRESSION DES RESULTATS

Le chromatographe est relié à un ordinateur équipé d'un logiciel permettant de calculer directement la concentration en mg / l pour chaque ion.

La teneur en ion est calculée en tenant compte de la masse de l'échantillon, du volume initial, du facteur de dilution et du volume injecté.

II.3.2.6 DOSAGE DES SUCRES TOTAUX ET SUCRES RÉDUCTEURS

II.3.2.6.1 PRINCIPE ET MODE OPERATOIRE

La méthode de Luff-Shoorl est utilisée pour la détermination des teneurs en ST et en SR. La liqueur sucrée est oxydée à chaud par une solution cupro-alkaline et l'excès de liqueur cuprique est titré par iodométrie. Parallèlement, on titre la liqueur cupro-alkaline.

Après avoir pesé 1 g de l'échantillon, le mode opératoire du dosage des ST et des SR se différencie sur une partie.

⇒ Opérations différentes

Sucres Totaux (ST)

- ❖ diluer la prise d'essai dans 50 ml d'eau déminéralisée ;
- ❖ ajouter 1 ml d'acide chlorhydrique (d = 1,18) ;
- ❖ mélanger et placer au bain marie bouillant pendant 3 min ;
- ❖ refroidir puis ajouter quelques gouttes de lessive de soude ;
- ❖ transvaser dans une fiole de 100 ml et compléter au trait de jauge.

Sucres Réducteurs (SR)

- ❖ diluer la prise d'essai dans 100 ml d'eau déminéralisée

⇒ Opérations identiques pour les deux dosages

- ❖ agiter et filtrer sur papier Whatman ;
- ❖ diluer le filtrat si nécessaire. Soit **d** le facteur de dilution ;

- ❖ prélever 25 ml de filtrat dilué dans une fiole conique de 250 ml ;
- ❖ ajouter 25 ml de solution cupro-alcaline ;
- ❖ ajouter quelques billes de verre ;
- ❖ porter à ébullition (qui doit être atteint rapidement) ;
- ❖ maintenir l'ébullition pendant 10 min. exactement ;
- ❖ refroidir immédiatement sous un courant d'eau froide ;
- ❖ ajouter 10 ml de solution d'iodure de potassium à 30 % ;
- ❖ ajouter 25 ml d'acide sulfurique à 25 % ;
- ❖ titrer par la solution 0,1 N de thiosulfate de sodium en présence d'empois d'amidon ;
- ❖ effectuer un dosage témoin dans lequel les 25 ml du filtrat sont remplacés par 25 ml d'eau distillée.

II.3.2.6.2 EXPRESSION DES RESULTATS

La teneur en SR pour les produits solides, exprimée en mg pour 100 g de produit, est donnée par la relation :

$$\% \text{ sucres réducteurs} = m \times \frac{100}{25} \times d \times \frac{100}{E}$$

Avec E la prise d'essai en gramme (échantillon solide), m la masse de sucre exprimée en mg, déterminée à partir de la table de correspondance après calcul de la différence de volume entre le blanc et l'échantillon ($V_0 - V_1$), et d le facteur de dilution. V_0 et V_1 correspondent respectivement au volume de solution de thiosulfate 0,1 N utilisé pour titrer le blanc et celui utilisé pour titrer l'échantillon. Un extrait de la table de Luff-Schoorl est présenté en Annexe I.

II.3.2.7 DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN POLYPHÉNOLS

II.3.2.7.1 PRINCIPE ET MODE OPERATOIRE

Les composés phénoliques sont des métabolites secondaires caractérisés par un noyau aromatique portant des groupements hydroxyles libres ou engagés avec un glucide. Après une hydrolyse acide, la teneur en polyphénols est déterminée par la méthode de dosage spectrophotométrique au réactif de Folin-Ciocalteu. En milieu basique ce réactif oxyde les groupements oxydables des polyphénols présents dans l'échantillon. Les produits de réaction de couleur bleue sont un mélange d'oxydes bleus de tungstène et de molybdène présentant un maximum d'absorption comprise entre 620 et 760 nm et dont l'intensité est proportionnelle à la quantité de phénols présents dans l'échantillon.

Le mode opératoire est le suivant :

⇒ Extraction des phénols totaux

- ❖ dans un bécher de 100 ml, peser exactement 100 mg de poudre ;

- ❖ diluer la prise d'essai dans 50 ml d'eau déminéralisée ;
- ❖ ajouter 1 ml d'acide chlorhydrique (d = 1,18) ;
- ❖ mélanger et placer au bain-marie bouillant pendant 3 min. ;
- ❖ refroidir puis ajouter quelques gouttes de lessive de soude ;
- ❖ transvaser dans une fiole de 100 ml et compléter au trait de jauge
- ❖ ajouter 10 ml d'acétone / eau 70 / 30 ;
- ❖ agiter pendant 30 min. sur un agitateur magnétique ;
- ❖ filtrer sur papier Whatman : ce filtrat est appelé extrait brut ;
- ❖ l'extrait est dosé en triple. Dans un tube à vis de 10 ml mettre 50 microlitres de l'extrait et 450 microlitres d'eau distillée.

⇒ Dosage au FOLIN

Dans chacun des tubes à vis contenant 500 microlitre de mélange eau et extrait, ajouter :

- ❖ 2.5 ml de réactif de FOLIN dilué au dixième dans de l'eau distillée ;
- ❖ agiter au vortex et incubé 10 min. à température ambiante ;
- ❖ ajouter 2.5 ml de carbonate de sodium ;
- ❖ agiter au vortex et incubé immédiatement dans un bain-marie à 50 °C pendant 15 min. ;
- ❖ refroidir rapidement les tubes dans de l'eau froide ;
- ❖ faire le zéro du spectre avec de l'eau distillée ;
- ❖ mesurer l'absorbance à la longueur d'onde de 760 nm.

⇒ Courbe d'étalonnage

Une courbe d'étalonnage est tracée avec des solutions d'acide gallique de concentrations connues comprises entre 50 et 600 mg / l (variation par pas de 50). L'étalonnage est réalisé en suivant le même protocole que pour les échantillons décrit ci-dessus. L'équation de cette courbe permet de déterminer la teneur en polyphénols. Les résultats sont exprimés en équivalent d'acide gallique (acide 3,4,5-trihydroxybenzoïque).

II.3.2.7.2 EXPRESSION DES RESULTATS

Soit E l'absorbance de la solution échantillon, Ve volume initial d'extraction, V1 est le volume d'essai pour le dosage au FOLIN. La pente correspond à celle de la droite d'étalonnage.

$$\text{phénols totaux} = \frac{DO}{\text{pente}} * \frac{Ve}{V1}$$

II.3.2.8 DÉTERMINATION DU POTENTIEL HYDROGÈNE (PH)

II.3.2.8.1 PRINCIPE ET MODE OPERATOIRE

La mesure du pH est effectuée par potentiométrie selon les normes de référence NF V76-122 : 1994 et EN 1132 :1994. Le pH est mesuré à 10 % selon le mode opératoire ci-après :

- ❖ peser 5 g de l'échantillon d'oignon ;
- ❖ dissoudre dans 50 ml d'eau déminéralisée ;
- ❖ bien homogénéiser ;
- ❖ étalonner le pH-mètre avec deux solutions tampons à 20 °C de pH 7 et 4 ;
- ❖ mesurer le pH des échantillons.

Les mesures sont effectuées en triple et entre chaque mesure, l'électrode est bien rincée et essuyée.

II.3.2.8.2 EXPRESSION DES RESULTATS

Le pH à 10 % est lu directement par potentiométrie.

II.3.2.9 DÉTERMINATION DE L'ACIDITÉ TITRABLE

II.3.2.9.1 PRINCIPE ET MODE OPERATOIRE

L'acidité titrable correspond à la teneur en acides organiques. Elle est déterminée par titrage potentiométrique avec de la soude selon les normes de référence NF V 05-101 : janvier 1974 et EN 12147 : décembre 1996.

Le mode opératoire est :

⇒ Vérification du titre de la soude

- ❖ prélever 5 ml d'acide HCl 0,1 N ;
- ❖ ajouter 30 ml d'eau distillée et doser avec la solution de soude jusqu'à pH 7 ;
- ❖ refaire l'opération 3 fois, faire la moyenne et utiliser le nouveau titre de la soude pour exprimer les résultats des échantillons à analyser.

$$N2 = \frac{(N1 * V1)}{V2}$$

Avec N1, le titre de l'acide, V1 le volume d'acide prélevé (ml), N2 le titre de la soude et V2 le volume de la soude (ml) utilisé pour titrer l'acide.

⇒ Mesure sur produit sec / lyophilisé / semi-solide

- ❖ découper échantillon en petits morceaux ;
- ❖ peser 1,5 g de l'échantillon dans une fiole conique ;
- ❖ ajouter 40 ml d'eau distillée et homogénéiser ;
- ❖ adapter à la fiole un réfrigérant à reflux et chauffer sur un agitateur magnétique pendant 30 min. à 100 °C ;
- ❖ refroidir et transférer dans une fiole jaugée de 50 ml, compléter avec de l'eau distillée et homogénéiser ;
- ❖ en prélever un volume V0 à mettre dans un bécher (avec barreau aimanté) et ajouter 30 ml d'eau distillée ;

- ❖ mettre en marche l'agitateur et titrer avec la soude (V1) jusqu'à pH 8,1.

II.3.2.9.2 EXPRESSION DES RESULTATS

L'Acidité Titrable (AT) en meq pour 100 g de produit

$$AT = N * V1 * \left(\frac{50}{V0}\right) * \frac{100}{m}$$

Avec N la normalité de la soude utilisée, V1 le volume en ml de la solution d'hydroxyde de sodium, m la masse en g de produit prélevé, 50 le volume final de la solution dans la fiole jaugée et V0 est le volume en millilitres de la prise d'essai aliquote de la solution.

II.3.3 RÉSULTATS

II.3.3.1 CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUES

Les caractéristiques physico-chimiques analysées pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 sont l'humidité, l'activité de l'eau, l'acidité titrable, le pH et le taux de cendres. Ces caractéristiques sont présentées dans le **Tableau IX**.

Tableau IX : Teneur en eau, activité de l'eau, acidité titrable, pH et taux de cendre des variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 avant séchage.

Variétés	Humidité (% bh)	Activité de l'eau	Acidité Titrable (mEq / 100 g ms)	pH à 10 %	Cendres (g/100 g ms)
Violet de Galmi	85,56 ± 0,60	0,945 ± 0,011	6,12 ± 0,00	6,42 ± 0,03	5,735 ± 0,30
Safari	88,11 ± 0,61	0,950 ± 0,001	9,23 ± 0,00	6,29 ± 0,06	6,440 ± 0,60
Gandiol F1	86,99 ± 0,10	0,940 ± 0,013	4,51 ± 0,02	6,35 ± 0,03	7,419 ± 0,44
Orient F1	89,13 ± 0,69	0,947 ± 0,009	6,13 ± 0,38	6,37 ± 0,03	5,934 ± 0,09

Les résultats d'analyse physico-chimiques (**Tableau IX**) montrent que :

- ❖ la teneur en eau, comprise entre 85,56 et 89,13, est inférieure à celle fournie dans la table de composition nutritionnelle des aliments [14], exceptée pour la teneur en eau de la variété Orient F1 qui est sensiblement égale ;
- ❖ les teneurs en matières sèches des variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 sont respectivement de 14,44, 11,89, 13,01 et 10,87 g / 100 g ms. L'eau représente ainsi le constituant majoritaire dans les quatre variétés d'oignon et elle est presque totalement libre avec des valeurs de l'activité de l'eau (aw) de l'ordre de 0,95 ;
- ❖ le taux de cendre des quatre variétés est supérieur à celui de la table de composition nutritionnelle des aliments (0,35 %). Le classement des variétés par ordre du taux de cendre le plus élevé est Gandiol F1, Safari, Orient F1 et Violet de Galmi.

II.3.3.2 CARACTÉRISATION BIOCHIMIQUES

⇒ Les macronutriments

Les lipides ne représentant que 0,1 % [14] dans les oignons, les macronutriments déterminés pour les quatre variétés sont la teneur en protéines, les ST et les SR (Tableau X).

Comparées aux valeurs de la table de composition nutritionnelle des aliments (protéines 1,1 % et sucres 9,34 %), les teneurs en protéines des quatre variétés sont 1,5 à 2 fois supérieures selon les variétés. Quant aux ST, les teneurs des variétés Violet de Galmi et Gandiol F1 sont légèrement supérieures, tandis que celles des variétés Safari et Orient F1 sont inférieures.

Tableau X : Teneur en protéines, en sucres totaux et en sucres réducteurs des variétés Violets de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.

Variétés	Protéines (g/100 g ms)	Sucres Totaux (g/100 g ms)	Sucres Réducteurs (g/100 g ms)
Violet de Galmi	15,990 ± 0,51	76,035 ± 0,91	24,605 ± 0,58
Safari	13,383 ± 0,34	76,410 ± 0,61	21,236 ± 0,46
Gandiol F1	12,124 ± 0,50	74,670 ± 0,89	25,604 ± 0,23
Orient F1	14,113 ± 0,04	74,007 ± 0,85	20,821 ± 0,48

Pour l'ensemble des variétés, les teneurs en protéines et sucres totaux sont au-dessus des moyennes des légumes (respectivement de 1,940 % et 4,48 %).

⇒ Les micronutriments

Les micronutriments caractérisés (Tableau XI) pour les quatre variétés d'oignon sont les polyphénols et les minéraux à savoir le sodium, le potassium, le magnésium et le calcium lesquels sont présents en plus grande quantité dans les oignons d'après la littérature [14], [15].

Tableau XI : Teneur en polyphénols et en minéraux (sodium, potassium, magnésium et calcium) des variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.

Variétés	Polyphénols (g EAG/ 100 g ms)	Minéraux (mg/100 g ms)			
		Sodium (mg/100 g ms)	Potassium (mg/100 g ms)	Magnésium (mg/100 g ms)	Calcium (mg/100 g ms)
Violet de Galmi	0,111 ± 0,0040	603,853 ± 0,88	230,343 ± 1,50	230,343 ± 0,20	75,605 ± 2,60
Safari	0,134 ± 0,0065	670,685 ± 0,14	297,050 ± 0,24	26,800 ± 0,05	112,188 ± 1,10
Gandiol F1	0,162 ± 0,0016	587,848 ± 0,41	175,230 ± 0,64	98,403 ± 0,06	111,450 ± 9,46
Orient F1	0,312 ± 0,0041	685,043 ± 0,07	238,783 ± 0,69	23,073 ± 0,01	36,270 ± 2,90

❖ Les polyphénols

Les teneurs en polyphénols totaux comprises entre (0,111 et 0,312 g EAG / 100 g ms) (**Tableau XI**) sont différentes d'une variété à une autre. Les variétés les plus riches en polyphénols sont respectivement Orient F1 (0,312 g EAG / 100 g ms), Gandiol F1 (0,162 g EAG / 100 g ms), Safari (0,134 g EAG / 100 g ms) et Violet de Galmi (0,111 g EAG / 100 g ms). L'analyse de variance révèle une différence significative avec une valeur de p de 0,00009.

❖ Les minéraux

Les teneurs en sodium, potassium, magnésium et calcium dans les quatre variétés exprimées en mg pour 100 g de matières fraîches sont respectivement comprises entre (74,4 ± 0,001 et 87,20 ± 0,032), (22,79 ± 0,010 et 33,26 ± 0,003), (2,51 ± 0,000 et 33,26 ± 0,004) et (3,94 ± 0,035 et 14,49 ± 0,16). D'une variété à une autre, une différence significative est observée pour le sodium et le potassium (p < 5 %), tandis que pour le calcium et le magnésium, la différence n'est pas significative (p ≥ 5 %).

II.3.4 DISCUSSION

La variété Violet de Galmi, avec le plus faible taux d'humidité est mieux disposée à une conservation plus longue à l'état frais, suivie respectivement des variétés Gandiol F1, Safari et Orient F1. Toutefois, les valeurs du pH de l'ordre de 6, combinées aux fortes valeurs d'humidité et d'aw, rendent les quatre variétés très favorables au développement des levures, des moisissures et des bactéries selon les conditions de conservation [17], [108], [109]. Au cours du séchage, les fortes teneurs en sucres observées pour les quatre variétés d'oignon constitueraient éventuellement un frein en provoquant un phénomène de croustissage à la surface des produits en fonction de la vitesse de séchage. Par ailleurs, la teneur en sucre réducteur des quatre variétés d'oignon (comprise entre 20,81 et 25,604 g / 100 g ms), environ 5 à 6 fois plus élevée que celle de la table de composition des aliments (4,25 g / 100 g) peut avoir un impact sur la qualité organoleptique par accélération de la réaction de Maillard.

L'apport énergétique, calculé selon la méthode d'Atwater, est compris entre 38,27 et 53,15 Kcal / 100 g base humide (contre 40 dans la table CIQUAL 2017). La variété Violet de Galmi dispose de la plus grande valeur énergétique (53,15), suivie respectivement des variétés Gandiol F1 (45,15), Safari (42,70) et Orient F1 (38,27).

Concernant les macroéléments majeurs tels que le sodium (74,4 et 87,20 mg / 100 g base humide), le potassium (22,79 et 33,26 mg / 100 g base humide), le magnésium (2,51 et 33,26 mg / 100 g base humide) et le calcium (3,94 et 14,49 mg / 100 g base humide), les teneurs sont inférieures aux valeurs de la table de composition des aliments [Sodium 4 mg, potassium 146 mg, magnésium 10 mg et calcium 23 mg / 100 g base humide (CIQUAL, 2017)], exceptées pour la teneur en sodium des quatre variétés et la teneur en magnésium des variétés Violet de Galmi et Gandiol F1. Bien que les teneurs soient faibles comparées aux valeurs moyennes trouvées dans la littérature, l'oignon constitue une source non négligeable pour améliorer l'apport nécessaire dans différentes fonctions de l'organisme tel que le fonctionnement musculaire pour le calcium, le potassium et le magnésium. Le classement des variétés par ordre décroissant de teneur en minéraux est :

- ❖ Orient F1, Safari, Violet de Galmi et Gandiol F1 pour le sodium ;
- ❖ Safari, Orient F1, Violet de Galmi et Gandiol F1 pour le potassium ;
- ❖ Violet de Galmi, Gandiol F1, Safari et Orient F1 pour magnésium ;
- ❖ Gandiol F1, Violet de Galmi et Orient F1 pour le calcium.

Quant aux teneurs en polyphénols des quatre variétés, exprimées sur la base de matières fraîches, elles sont comprises entre (16,07 et 33,98) mg EAG / 100 g base humide et sont inférieures à celles trouvées pour des variétés d'oignon rouge par Yang *et al.* en 2004 (81,5 mg / 100g base humide), par Al Mamary en 2002 (64,18 mg / 100 g base humide) et par Kahkonen *et al.* en 1999 (300 mg / 100 g ms). Pour la variété Violet de Galmi, Ouedrago *et al.* ont trouvé en 2015 un taux de polyphénols totaux de 114,9 mg / 100 g base humide pour la variété Galmi. Par conséquent, aussi bien la variété, la zone géographique que les conditions de culture ont un impact sur la teneur en polyphénols. Le mode d'utilisation des produits peut avoir un effet bénéfique ou délétère sur les polyphénols [110]. L'évolution de ce constituant d'intérêt thérapeutique au cours du séchage représente un critère essentiel pour l'optimisation du procédé.

En somme, le phénomène de croûtage lié à la teneur en sucre élevée peut éventuellement être un frein au séchage et causer une altération de la qualité du produit. Par ailleurs, l'impact du mode d'utilisation prouvé aussi bien sur les teneurs en minéraux [111], [112] que sur la teneur en polyphénols [30], [41], [43], montrent que leur suivi est indispensable au cours du séchage. Ce suivi, particulièrement celui des molécules d'intérêt thérapeutiques que sont les polyphénols, est déterminant pour la mise au point des conditions optimales de séchage.

II.4 EFFET DE LA VARIÉTÉ ET DE LA TEMPÉRATURE SUR LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE

Des résultats de recherches antérieures sur différents produits alimentaires reflètent que la cinétique de séchage dépend des conditions de séchage, des interactions entre les différents constituants du produit alimentaire particulièrement l'eau, mais également de la texture du produit. D'après :

- ❖ Clemente *et al.* en 2011 sur la patate [98], Doymaz en 2010 sur la banane [113], Babalis *et al.* en 2004 sur la figue [19], ainsi que Krokida *et al.* en 2003 sur différents produits (céleri, oignon, ail, tomate, carotte, maïs, etc.) [16], le temps de séchage diminue lorsque la température de séchage augmente dans la plage de 30 °C à 85 °C par pas de 5 °C ou de 10 °C. De plus, le coefficient de diffusivité effective augmente avec la température [113] ;
- ❖ Clemente *et al.* en 2011 sur la patate, ainsi que Babalis *et al.* en 2004 sur la figue [19], [98], le coefficient de diffusivité effective (D_{eff}) n'augmente plus au-delà d'une vitesse de séchage de 2 m s⁻¹ ;
- ❖ Brooks *et al.* en 2004 sur la tomate et Madamba *et al.* en 1996 sur l'ail (épaisseur 2 à 4 mm), le temps de séchage diminue lorsque l'épaisseur diminue tandis que le taux de séchage augmente et permet ainsi de préserver la qualité [114], [115].

Concernant l'oignon, Krokida *et al.* en 2003 [16], Sarsavadia *et al.* en 1999 [95] et Kiranoudis *et al.* en 1992 [91] ont montré qu'avec des vitesses de ventilation comprises entre 0,25 et 1,5 m s⁻¹ le taux de séchage augmente, tandis que des vitesses de ventilation supérieures à 1,5 m s⁻¹ n'ont plus d'impact sur le taux de séchage. Plus l'épaisseur des échantillons est petite (Sarsavadia *et al.* en 1999, ainsi que Kiranoudis *et al.* en 1992 avec des épaisseurs comprises entre 2,5 et 15 mm), plus le taux de séchage est élevé [91], [95]. Cette influence de l'épaisseur sur le taux de séchage de l'oignon concorde avec les résultats de Mazza et Lemaguer en 1980 (épaisseur 1,5 mm) [116]. Cependant, les caractéristiques des cinétiques de séchage de l'oignon établies par ces différents auteurs présentent des différences liées aux conditions d'expérimentation mais également à l'origine des échantillons. Toutefois, aucune caractérisation de la cinétique de séchage de variétés d'oignon du Sénégal n'est relevée dans les études existantes. Pour preuve, les industriels de l'agroalimentaires, principaux utilisateurs de l'oignon séché au Sénégal, sont contraints de l'importer du fait de la non-maîtrise des procédés de séchage alors qu'environ 5 % à 40 % de pertes post-récolte sont observées à chaque campagne de production [44], [50]. Ce constat justifie ce travail dont l'objectif est de caractériser, selon différentes valeurs de températures, les cinétiques de séchage des variétés d'oignon, Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1, cultivées au Sénégal, de déterminer les coefficients de diffusivité effective ainsi que l'énergie d'activation nécessaire entre autres.

II.4.1 MATÉRIELS

II.4.1.1 MATÉRIELS VÉGÉTAL

Deux degrés de maturité (exprimé en pourcentage de tombaison des feuilles au démarrage de la récolte) sont testés pour chacune des variétés. Le degré de maturité est :

- ❖ inférieur ou égal à 80 % pour les variétés récoltées en mars 2015 et 2016 ;
- ❖ supérieur ou égal à 85 % pour les variétés récoltées en juin 2016 et 2017.

Les récoltes de la période de mars sont effectuées sans respect de l'itinéraire technique, notamment avant la maturité complète des bulbes tandis que celles de la période de juin sont faites à maturité.

II.4.1.2 MATÉRIEL DE SÉCHAGE ET D'ANALYSE

Les matériels d'analyse sont :

- ❖ une étuve de marque MEMMERT avec une précision de 0,1 °C;
- ❖ un thermohygromètre de marque voltcraft (précision 1°C et 3,5 %);
- ❖ une balance de précision de marque Denver instrument (précision 0,0001 g) ;
- ❖ un micromètre de marque RS PRO, à lecture digital (plage de lecture 0 à 25 mm, précision 0,001) ;
- ❖ des capsules en pyrex et la verrerie de laboratoire.

II.4.1.3 OUTILS GRAPHIQUES ET D'ANALYSES STATISTIQUE

Les logiciels utilisés pour l'exploitation des données :

- ❖ le logiciel R version 3.4.0 a été utilisé pour les analyses de variance et de concordances des mesures ;
- ❖ le logiciel Excel version 2016 est utilisé en tant qu'outil de calculs scientifiques pour les représentations graphiques et la détermination des coefficients de diffusivité effective et de l'énergie d'activation.

II.4.2 MÉTHODES

II.4.2.1 PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

La caractérisation de la cinétique de séchage des variétés d'oignon local est faite par la méthode gravimétrique. Le séchage est réalisé à l'étuve dans la plage de température allant de 50 °C à 70 °C avec un pas de 5 °C. La vitesse de la ventilation est fixée à 2,4 m s⁻¹ et l'humidité relative dans l'étuve varie entre 10 % et 15 %.

Les essais sont réalisés en triple avec dix grammes prélevés sur les oignons hachés finement de trois bulbes différents et étalés en monocouche dans des coupelles en pyrex (Cf. II.2.2 et II.2.3 pour la préparation des échantillons et le diagramme de séchage à l'étuve).

Les expériences sont menées sur deux années consécutives en mars 2015 et 2016 pour le degré de maturité inférieur ou égal à 80 % et en juin 2016 et 2017 pour celui supérieur ou égal 85 %.

La teneur en eau initiale (X_0) et la teneur en eau au bout de chaque heure de séchage ($X_{exp,t}$) sont déterminées par dessiccation à 105 °C pendant 2h :

- ❖ La teneur en eau initiale

$$X_0 = \frac{m_0 - m_{0,d}}{m_{0,d}} \quad \text{Équation 23}$$

avec m_0 la masse d'oignon à l'état frais et $m_{0,d}$ sa masse après dessiccation à 105°C.

- ❖ la teneur en eau aux différentes heures de séchage ($X_{exp,t}$)

$$X_{exp,t} = \frac{m_t - m_{t,d}}{m_{t,d}} \quad \text{Équation 24}$$

avec m_t la masse d'oignon séché au bout d'un temps t et $m_{t,d}$ sa masse après dessiccation à 105 °C.

II.4.2.2 CINÉTIQUES DE SÉCHAGE

Les cinétiques de séchage pour les quatre variétés sont caractérisées par les courbes de séchage de la teneur en eau réduite en fonction de temps :

$$X_{r\ exp,t} = f(t) \quad \text{Équation 25}$$

La teneur en eau réduite expérimentale aux différents temps de séchage ($X_{r\ exp,t}$) est calculée par :

$$X_{r\ exp,t} = \frac{X_{exp,t} - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} \quad \text{Équation 26}$$

Avec X_{eq} , la teneur en eau d'équilibre, négligeable devant $X_{exp,t}$ et X_0 pour des temps de séchage longs.

II.4.2.3 DÉTERMINATION DES COEFFICIENTS DE DIFFUSIVITÉ EFFECTIVE

La seconde loi de Fick appliquée à l'évolution de la teneur en eau réduite sur la phase 2 correspondant à la période à allure ralentie permet de calculer les coefficients de diffusivité effective aux différentes températures.

$$D_{eff} \frac{\partial^2 X_r}{\partial x^2} = \frac{\partial X_r}{\partial t} \quad \text{Équation 27}$$

La solution de cette seconde loi de Fick dans un espace x linéaire et à l'état instationnaire est

$$\ln X_{r\ exp,i} = -\left(\frac{\beta^2 D_{eff}}{e^2}\right)t + \ln \frac{4}{\beta^2} \quad \text{Équation 28}$$

Avec D_{eff} : le coefficient de diffusivité effective en $m^2\ s^{-1}$, β le coefficient de transfert de masse en $m\ s^{-1}$ et e l'épaisseur des morceaux d'oignon mesurée à l'aide d'un micromètre à lecture digitale (*Tableau XII*).

Tableau XII : Épaisseurs des échantillons des différentes variétés d'oignon caractérisées.

T (°C)	Épaisseur (mm)							
	Variétés							
	Galmi		Safari		Gandiol F1		Orient F1	
	Mars	Juin	Mars	Juin	Mars	Juin	Mars	Juin
50	1,48	1,27	1,51	1,19	1,51	1,26	1,36	1,06
55	1,78	1,49	1,76	1,43	2,02	1,58	1,75	1,34
60	1,98	1,69	1,82	1,67	2,09	1,50	1,77	1,33
65	2,03	1,84	2,00	1,92	2,11	1,63	1,88	1,36
70	2,06	1,64	2,33	1,95	2,14	1,60	2,05	1,44

L'épaisseur des échantillons étant très fine, la déformation du produit au cours du séchage est négligeable.

II.4.2.4 DÉTERMINATION DE L'ÉNERGIE D'ACTIVATION

La diffusion, responsable de la migration de l'eau sur la partie à allure décroissante (phase 2) des courbes de vitesse de séchage, suivant la loi d'Arrhénius, le coefficient de diffusivité effective des différentes variétés d'oignon, déterminé à partir des *Équation 23*, *Équation 24* et *Équation 26*, permet de calculer l'énergie d'activation utile au mécanisme en traçant les courbes selon l'équation ci-après.

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T} \quad \text{Équation 29}$$

Avec D_0 : le paramètre d'Arrhénius, E_a : l'énergie d'activation en $J\ mol^{-1}$, R : la constante des gaz parfait ($8,31\ J\ mol^{-1}\ K^{-1}$) et T : la température en degré Kelvin.

II.4.3 RÉSULTATS

La cinétique de séchage est caractérisée par le suivi de la teneur en eau au cours du temps de séchage à partir des *Équation 23*, *Équation 24* et *Équation 26*. Dans la théorie, ces courbes présentent trois phases pour des produits non hygroscopiques et peu déformables. Ces trois phases sont la période de mise en température, la période décroissante (phase isenthalpique où la température du produit reste constante et identique à celle de l'air environnant) et celle à allure

constante. Les coefficients de diffusivité effective aux différentes températures de séchage sont calculés à partir du tracé des courbes $\ln X_r \exp, t$ en fonction du temps (Équation 27 et Équation 28) sur la phase isenthalpique.

Quant à l'énergie d'activation, elle est déterminée par l'évolution des coefficients de diffusivité effective en fonction de l'inverse de la température de séchage à partir de l'Équation 29.

II.4.3.1 CINÉTIQUE DE SÉCHAGE

Les courbes de séchage, déterminées par la perte de poids au cours du temps de séchage des variétés d'oignon aux différents degrés de maturité, sont présentées sur les Figure 19 et Figure 20.

II.4.3.1.1 ÉVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU RÉDUITE DES VARIÉTÉS RECOLTEES A UN DEGRE DE MATURETE INFÉRIEURE A 80 %

La moyenne de la teneur en eau réduite (Figure 19) calculée à partir des résultats expérimentaux de mars 2015 et 2016 montre que le nombre et la durée des phases changent en fonction de la température de séchage des quatre variétés.

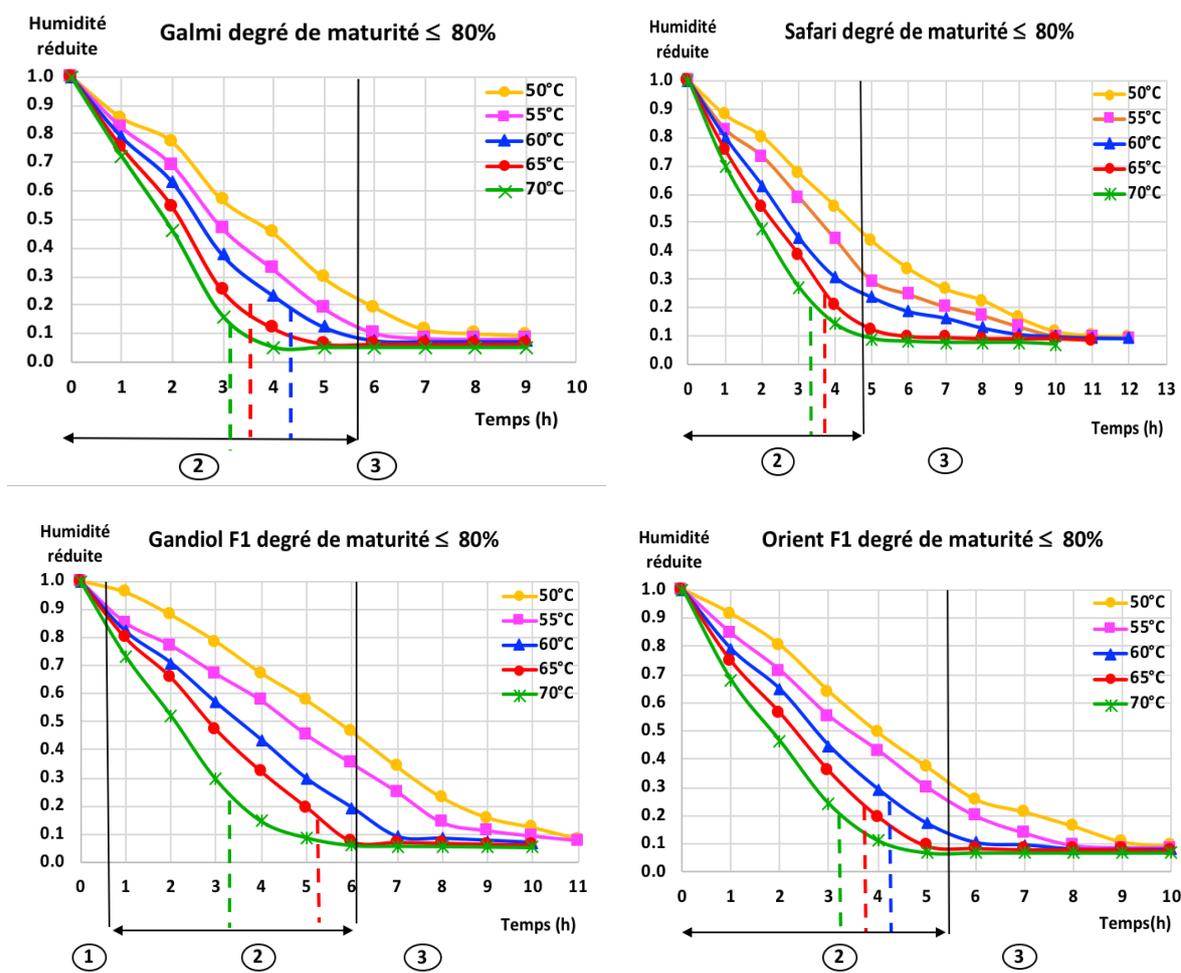


Figure 19 : Évolution en fonction du temps de séchage de la teneur en eau réduite des variétés récoltées avec un degré de maturité ≤ 80 %. (moyenne des résultats expérimentaux mars 2015 et 2016).

La phase de mise en température n'apparaît pas sur les courbes de séchage des variétés Violet de Galmi, Safari et Orient F1 quelle que soit la température de séchage. Cette phase de mise en température existe uniquement pour la variété Gandiol F1 à la température de séchage de 50 °C avec une durée de phase inférieure à une heure.

Par ailleurs, plus la température de séchage augmente, plus la durée de la phase 2 diminue et inversement pour la phase 3. Chaque augmentation de la température d'un pas de 5 °C se traduit par une baisse de 30 minutes à deux heures. Selon les variétés, la durée de la phase 2 se situe entre quatre heures quarante-cinq minutes et six heures.

II.4.3.1.2 ÉVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU RÉDUITE DES VARIÉTÉS RECOLTÉES A UN DEGRÉ DE MATURITÉ SUPÉRIEURE A 85 %

La **Figure 20** expose l'évolution de la moyenne de la teneur en eau réduite des variétés récoltées à un degré de maturité supérieur ou égal à 85 %. Cette moyenne est calculée à partir des pertes de poids enregistrés avec les expériences de juin 2016 et 2017.

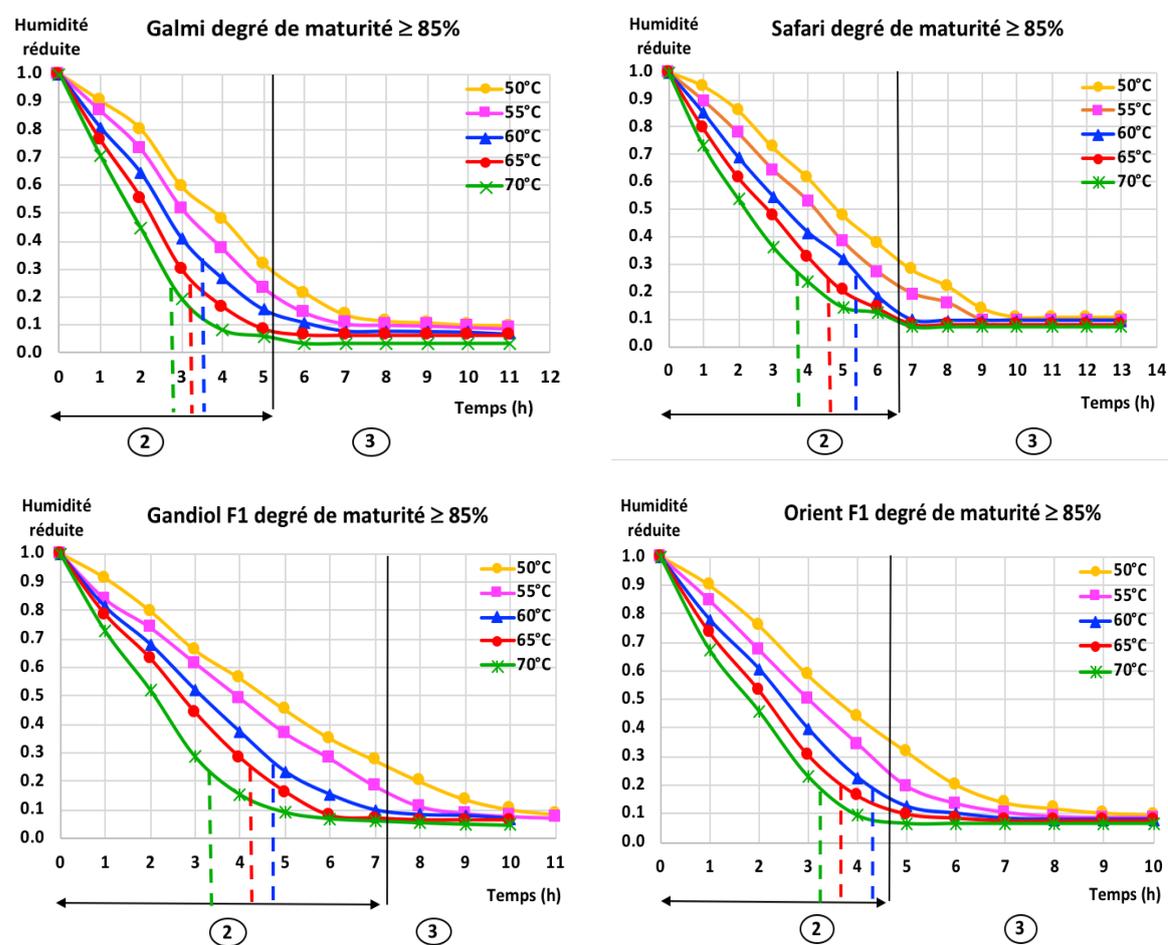


Figure 20 : Évolution en fonction du temps de séchage de la teneur en eau réduite des variétés d'oignon récoltées à un degré de maturité supérieure à 85 % (moyenne des résultats expérimentaux juin 2006 et 2017).

Les cinétiques des quatre variétés (**Figure 20**) reflètent l'existence de deux phases notamment la phase isenthalpique et celle à allure constante quelle que soit la température de séchage. La durée de la phase 2 varie entre cinq et sept heures en fonction des variétés et elle baisse de trente minutes à une heure pour chaque augmentation de la température d'un pas de 5 °C. L'effet inverse est observé pour la phase 3. En comparant l'évolution de la moyenne de la teneur en eau réduite selon le degré de maturité des variétés (**Figure 19** et **Figure 20**), il apparaît que :

- ❖ plus le degré de maturité des variétés est avancé, plus la durée de la phase 2 est importante ;
- ❖ l'effet de l'augmentation de la température sur la variabilité de la durée de la phase 2 est plus marqué avec le stade de maturité $\leq 80\%$ qu'avec celui $\geq 85\%$.

II.4.3.2 DÉTERMINATION DES COEFFICIENTS DE DIFFUSIVITÉ EFFECTIVE

Les **Figure 21** et **Figure 22** présentent respectivement l'évolution du logarithme Népérien de la moyenne de la teneur en eau réduite en fonction du temps de séchage pour un degré de maturité des variétés $\leq 80\%$ et $\geq 85\%$. Les valeurs de la moyenne de la teneur en eau réduite prises en compte sont celles des phases 2 (**Figure 19** et **Figure 20**) où le mécanisme diffusionnel gouverne la cinétique de séchage.

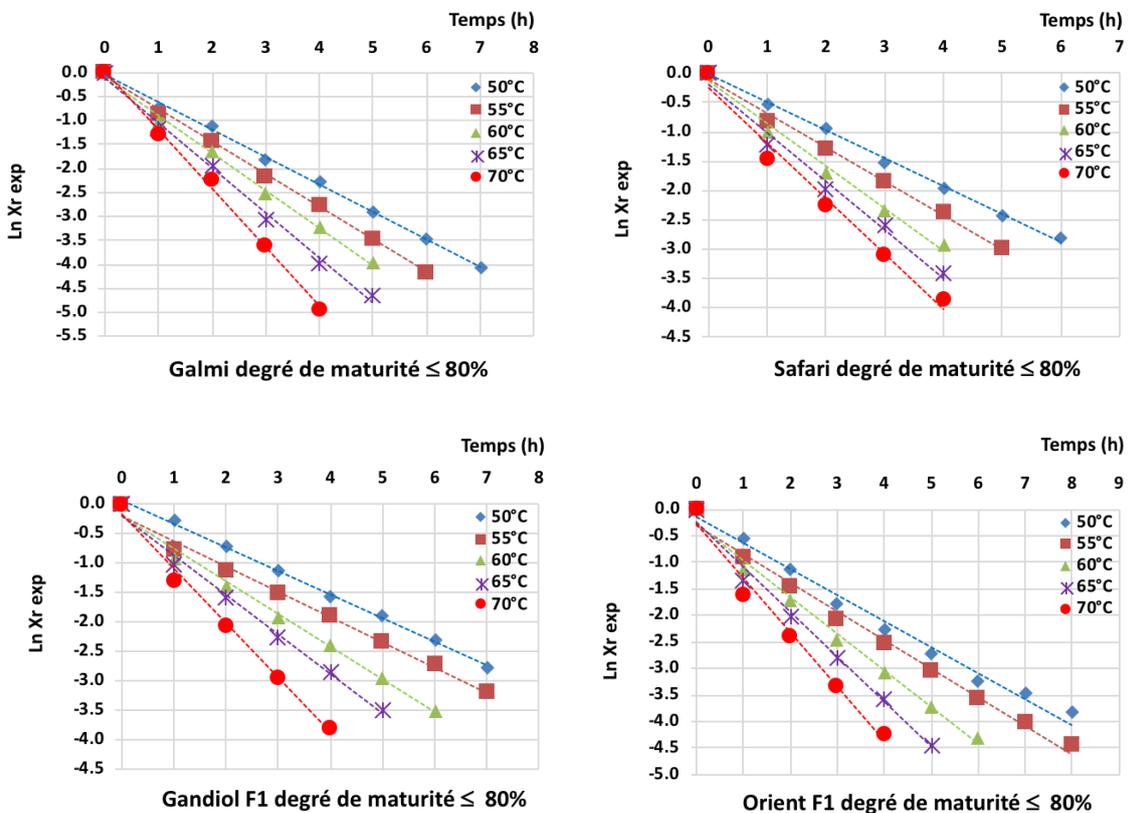


Figure 21 : Évolution en fonction du temps du logarithme Népérien de la teneur en eau (dans la phase isenthalpique de séchage des variétés à un degré de maturité $\leq 80\%$).

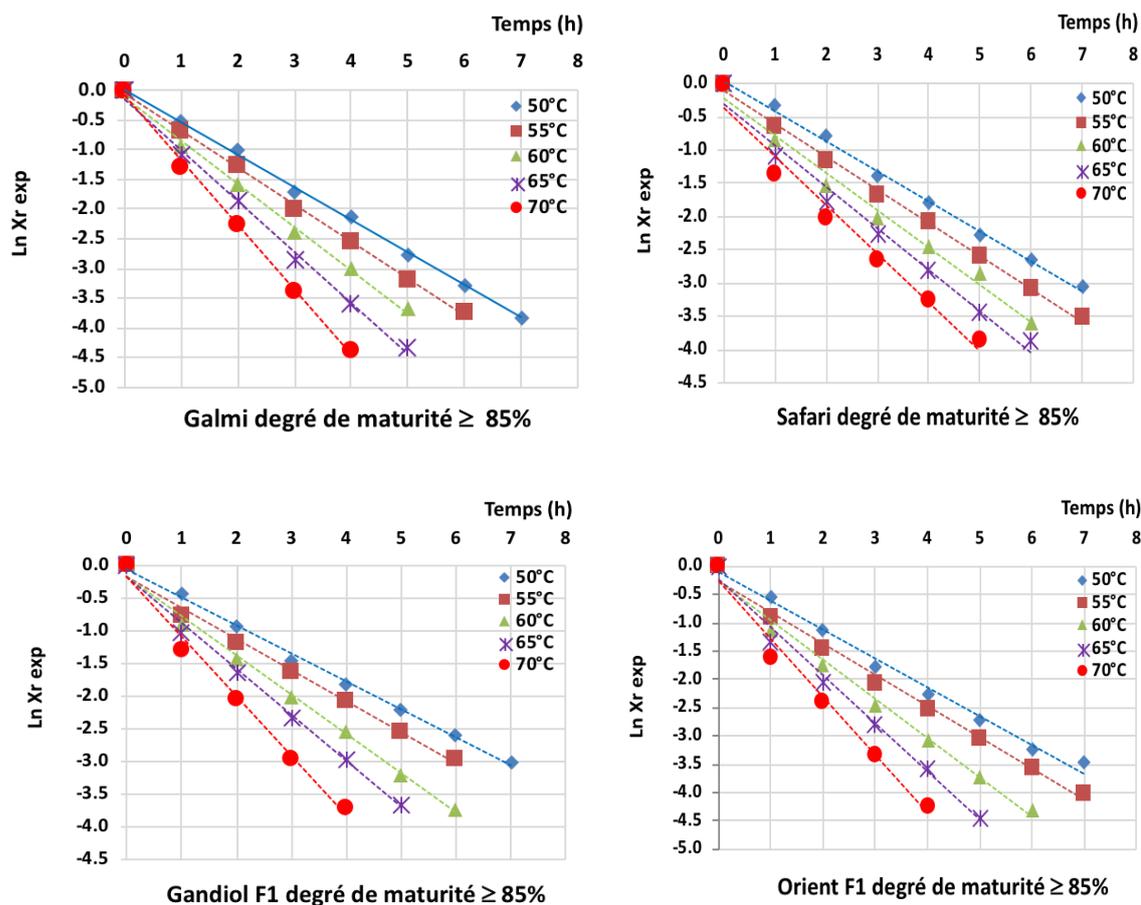


Figure 22 : Évolution en fonction du temps du logarithme Néperien de la teneur en eau (dans la phase isenthalpique de séchage des variétés à un degré de maturité $\geq 85\%$).

Les pentes des courbes des variétés Violet de Galmi et Safari à un degré de maturité inférieur ou égal à 80 % sont supérieures à celles à un degré de maturité supérieure ou égal à 85 % tandis que l'inverse est observé pour la variété Gandiol F1 et que pour la variété Orient F1 les pentes sont identiques. Les valeurs des pentes et des ordonnées à l'origine varient respectivement de 0,40 à 1,22 et -0,035 à 0,62. Ces valeurs, ainsi que les épaisseurs des échantillons (**Tableau XII**), intégrées dans l'**Équation 28** ont permis de déterminer les valeurs moyennes des coefficients de diffusivité effective (moyenne calculée pour les variétés récoltées en mars 2015 et 2016 avec un degré de maturité $\leq 80\%$ et celles récoltées en juin 2016 et 2017 avec un degré de maturité $\geq 85\%$) (**Tableau XIII**).

Globalement, les coefficients de diffusivité effective augmentent avec la température pour toutes les variétés. D'un degré de maturité à un autre au sein d'une même variété, les valeurs moyennes des coefficients de diffusivité effective au degré de maturité inférieur ou égal à 80 % sont supérieurs à ceux au degré de maturité supérieur ou égal à 85 % quelle que soit la température.

Tableau XIII : Valeurs moyennes des coefficients de diffusivité effective en fonction du degré de maturité et de la température de séchage des quatre variétés d'oignon.

Variété	Période de récolte	Coefficient de diffusivité effective D_{eff} ($m^2 s^{-1}$)				
		Température ($^{\circ}C$)				
		50	55	60	65	70
Violet de Galmi	Mars	$2,97 \cdot 10^{-11}$	$5,01 \cdot 10^{-11}$	$6,77 \cdot 10^{-11}$	$9,54 \cdot 10^{-11}$	$1,32 \cdot 10^{-10}$
	Juin	$2,25 \cdot 10^{-11}$	$3,32 \cdot 10^{-11}$	$4,63 \cdot 10^{-11}$	$6,29 \cdot 10^{-11}$	$8,05 \cdot 10^{-11}$
Safari	Mars	$2,60 \cdot 10^{-11}$	$3,98 \cdot 10^{-11}$	$5,17 \cdot 10^{-11}$	$6,77 \cdot 10^{-11}$	$9,77 \cdot 10^{-11}$
	Juin	$1,67 \cdot 10^{-11}$	$2,28 \cdot 10^{-11}$	$3,16 \cdot 10^{-11}$	$4,14 \cdot 10^{-11}$	$4,81 \cdot 10^{-11}$
Gandiol F1	Mars	$2,42 \cdot 10^{-11}$	$3,58 \cdot 10^{-11}$	$4,98 \cdot 10^{-11}$	$6,16 \cdot 10^{-11}$	$8,92 \cdot 10^{-11}$
	Juin	$1,68 \cdot 10^{-11}$	$2,50 \cdot 10^{-11}$	$2,87 \cdot 10^{-11}$	$3,96 \cdot 10^{-11}$	$4,86 \cdot 10^{-11}$
Orient F1	Mars	$2,18 \cdot 10^{-11}$	$3,30 \cdot 10^{-11}$	$4,18 \cdot 10^{-11}$	$5,88 \cdot 10^{-11}$	$8,12 \cdot 10^{-11}$
	Juin	$1,30 \cdot 10^{-11}$	$1,92 \cdot 10^{-11}$	$2,35 \cdot 10^{-11}$	$3,07 \cdot 10^{-11}$	$3,98 \cdot 10^{-11}$

Légende : mars (degré de maturité ≤ 80 %) ; juin (degré de maturité ≥ 85 %).

D'une variété à une autre, les valeurs moyennes des coefficients de diffusivité effective de la variété Violet de Galmi (comprise entre $2,25 \cdot 10^{-11}$ et $1,32 \cdot 10^{-10} m^2 s^{-1}$) sont supérieures à celles des trois autres variétés (situés entre $1,30 \cdot 10^{-11}$ et $9,77 \cdot 10^{-11} m^2 s^{-1}$) quel que soit le degré de maturité.

II.4.3.3 DÉTERMINATION DE L'ÉNERGIE D'ACTIVATION EN FONCTION DES PÉRIODES DE RÉCOLTE

Les courbes du logarithme Népérien des valeurs moyennes des coefficients de diffusivité effective par période en fonction de l'inverse de la température permettant le calcul de l'énergie d'activation sont présentées sur la **Figure 23**.

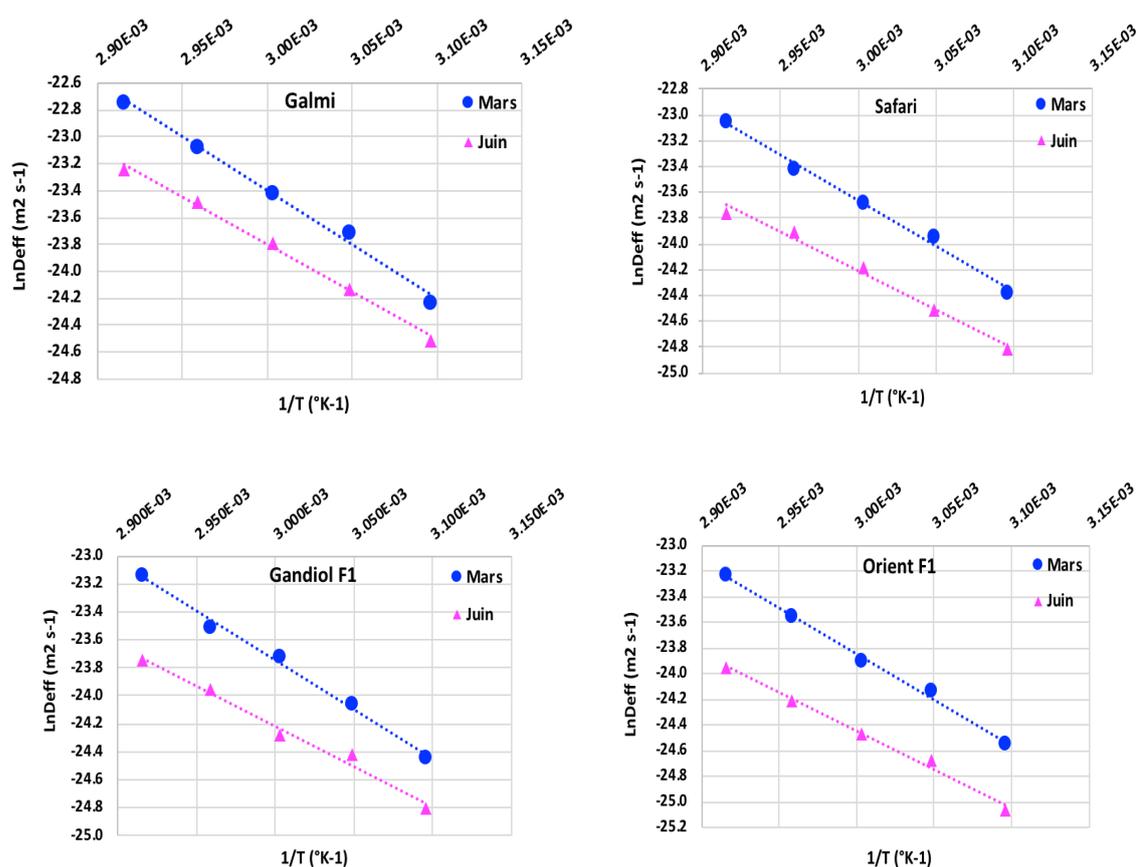


Figure 23 : Évolution de la moyenne des coefficients de diffusivité effective des variétés aux différentes températures de séchage (mars pour le degré de maturité 80 % et juin pour 85 %).

Les courbes de tendance obtenues par régression pour les quatre variétés sur les périodes de récolte de mars et juin, sont des droites dont les équations sont décrites dans le **Tableau XIV**. Les coefficients de corrélation sont toutes comprises entre 0,984 et 0,996.

Tableau XIV : Équations des coefficients de diffusivité effective moyenne et coefficients de corrélation selon la période de récolte.

Variété	Période de récolte	Équation	Coefficients de corrélation
Violet de Galmi	Mars	$\text{Ln Deff} = - 8027,4 (1/T) + 0,68$	0,991
	Juin	$\text{Ln Deff} = - 7068,9 (1/T) - 2,60$	0,996
Safari`	Mars	$\text{Ln Deff} = - 7059,0 (1/T) - 2,49$	0,993
	Juin	$\text{Ln Deff} = - 6011,9 (1/T) - 6,17$	0,988
Gandiol F1	Mars	$\text{Ln Deff} = - 6997,0 (1/T) - 2,75$	0,993
	Juin	$\text{Ln Deff} = - 5731,5 (1/T) - 7,02$	0,984
Orient F1	Mars	$\text{Ln Deff} = - 7114,5 (1/T) - 2,50$	0,995
	Juin	$\text{Ln Deff} = - 6001,3 (1/T) - 6,44$	0,992

Les valeurs de l'énergie d'activation par période (**Tableau XV**), calculées à partir des pentes des différentes équations établies par régression linéaire (**Tableau XIV**), sont comprises entre 47,63 et 66,71 KJ mol⁻¹.

Tableau XV : Énergie d'activation moyenne des variétés d'oignon en fonction de la période de récolte.

Énergie d'activation moyenne (KJ mol ⁻¹)				
Variété				
Période de récolte	Violet de Galmi	Safari	Gandiol F1	Orient F1
Mars	66,71 ± 0,12	58,66 ± 0,15	58,15 ± 0,19	59,12 ± 0,13
Juin	58,74 ± 0,11	49,96 ± 0,77	47,63 ± 0,28	49,87 ± 0,41

Quel que soit le degré de maturité, l'énergie d'activation (**Tableau XV**) pour la variété Violet de Galmi est supérieure à celle des trois autres variétés. La différence est de 9,59 ± 1,32 KJ mol⁻¹ pour le degré de maturité inférieur ou égal à 80 % et de 8,07 ± 0,49 KJ mol⁻¹ pour celui supérieur ou égal à 85 %. L'énergie d'activation des trois autres variétés est sensiblement identiques avec dans l'ordre décroissant la variété Orient F1, Safari et Gandiol F1.

Au sein de chaque variété, l'énergie d'activation nécessaire pour le degré de maturité inférieur ou égal à 80 % est au-dessus de celle pour le degré de maturité supérieur ou égal à 85 %. Les différences pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 sont respectivement de 7,97; 8,70; 10,52 et 9,25 KJ mol⁻¹.

II.4.3.4 TEST STATISTIQUE SUR LES COEFFICIENTS DE DIFFUSIVITÉ EFFECTIVE ET LES ÉNERGIES D'ACTIVATION

Les résultats des tests statistiques (analyse de la variance) effectués montrent que la température, le degré de maturité et la variété ont une influence très significative sur les coefficients de diffusivité effective avec des valeurs de p inférieures à 2,20 10⁻¹⁶ (pour la température et le degré de maturité) et égale à 1,08 10⁻¹² (pour la variété). Sur l'énergie d'activation, la période et la variété ont respectivement une influence moyennement (valeur de p égale 0,003) et faiblement (valeur de p égale à 0,05) significative.

II.4.3.4.1 COMPARAISON SELON LES PERIODES AU SEIN DE CHAQUE VARIETE

Le test t de Welch appliqué pour la comparaison des moyennes (mars *versus* juin) des coefficients de diffusivité effective et de l'énergie d'activation (**Tableau XVI**) au sein de chaque variété reflète des valeurs de p supérieures à 5 % exceptées pour les coefficients de diffusivité effective des variétés Safari, Gandiol F1 et Orient F1.

Tableau XVI : Paramètres du test t de Welch pour la comparaison des moyennes (mars versus juin) de coefficients de diffusivité effective et de l'énergie d'activation au sein de chaque variété.

Variété	Valeurs de p	
	Diffusivité effective	Énergie d'activation
Violet de Galmi	0,08	0,40
Safari	0,02	0,26
Gandiol F1	0,03	0,18
Orient F1	0,01	0,09

II.4.3.4.2 COMPARAISON SELON LES PERIODES ENTRE LES VARIETES

L'analyse de la variance sur les coefficients de diffusivité effective des périodes de mars et de juin aboutit respectivement aux valeurs de p de 0,16 et 0,01, tandis que ceux sur l'énergie d'activation sont de 0,49 et 0,12. La relation entre les différentes variétés évaluée par le test de Turkey est présentée dans le **Tableau XVII**. Toutes les valeurs de p sont supérieures à 5 %, exceptée pour la comparaison des coefficients de diffusivité effective Violet de Galmi et Orient F1 sur la période de juin.

Tableau XVII : Paramètre du test de Turkey pour la comparaison des moyennes de coefficients de diffusivité effective et de l'énergie d'activation entre les variétés.

Variété comparée	Valeurs de p			
	Diffusivité effective		Énergie d'activation	
	Mars	Juin	Mars	Juin
Gandiol F1-Orient F1	0,98	0,77	0,99	0,97
Gandiol F1-Safari	0,98	1,00	1,00	0,97
Safari-Orient F1	0,88	0,74	1,00	1,00
Violet de Galmi-Orient F1	0,14	0,01	0,62	0,19
Violet de Galmi-Gandiol F1	0,28	0,07	0,51	0,12
Violet de Galmi-Safari	0,47	0,08	0,57	0,19

II.4.4 DISCUSSION

Les valeurs moyennes des coefficients de diffusivité effective ($m^2 s^{-1}$) au degré de maturité inférieur ou égal 80 % et au degré de maturité supérieur ou égal à 85 % déterminées à partir des cinétiques (**Figure 19**, **Figure 20**, **Figure 21** et **Figure 22**) sont respectivement comprises entre :

- ❖ Violet de Galmi : $2.97 \cdot 10^{-11}$ et $1.32 \cdot 10^{-10}$ / $2.25 \cdot 10^{-11}$ et $8.05 \cdot 10^{-11}$;
- ❖ Safari : $2.60 \cdot 10^{-11}$ et $9.77 \cdot 10^{-11}$ / $1.67 \cdot 10^{-11}$ et $4.81 \cdot 10^{-11}$;
- ❖ Gandiol F1 : $2.42 \cdot 10^{-11}$ et $8.92 \cdot 10^{-11}$ / $1.68 \cdot 10^{-11}$ et $4.86 \cdot 10^{-11}$;
- ❖ Orient F1 : $2.18 \cdot 10^{-11}$ et $8.12 \cdot 10^{-11}$ / $1.30 \cdot 10^{-11}$ et $3.98 \cdot 10^{-11}$.

Ces coefficients augmentent très significativement en fonction de la température et du degré de maturité. Les résultats obtenus sur les coefficients de diffusivité effective sont comparables à ceux trouvés par des travaux antérieurs pour les fruits et légumes tels que le maïs, le gombo, haricot vert, banane, feuilles d'olives etc. [113], [117]–[121].

Le test t de Welch appliqué pour la comparaison des moyennes des coefficients de diffusivité effective au sein de chaque variété reflète une différence significative entre les périodes de mars et de juin avec une valeur de p inférieur à 5 % pour les variétés Safari, Gandiol F1 et Orient F1, tandis qu'avec une valeur de p égale à 0,08, la variété Violet de Galmi ne présente pas de différence significative (**Tableau XVI**). Il ressort de cette comparaison que les variétés de la période de mars dont le degré de maturité est inférieur à celui de la période de juin ont de coefficients de diffusivité effective supérieurs à ceux de la période de juin.

Ainsi, plus le degré de maturité est élevé moins la teneur en eau libre dans la matière est importante et plus le coefficient de diffusivité effective est faible [122]–[124].

Entre les variétés, l'analyse de la variance fait apparaître une différence significative au niveau des coefficients de diffusivité effective uniquement pour la période de juin avec une valeur de p égale à 0,01. Toutefois, le test de Turkey (**Tableau XVII**) montre une différence significative entre les variétés Violet de Galmi et Orient F1 (valeur de p égale à 0,01). La comparaison de la variété Violet de Galmi aux variétés Safari, Gandiol F1 et Orient F1 présente plus de différences (valeurs de p comprises entre 0,01 et 0,47) que la comparaison des trois dernières variétés entre elles (valeurs de p comprises entre 0,74 et 1).

Quant à l'énergie d'activation (**Tableau XV**), les résultats obtenus avec les variétés de mars (degrés de maturité plus faible que celui de juin), sont plus élevés que ceux des variétés de juin. En effet, dans cette partie à allure décroissante où le phénomène diffusionnel prédomine, plus le produit contient d'eau libre et plus l'énergie d'activation est importante. Quelle que soit la période, la variété Violet de Galmi nécessite une énergie d'activation (comprise entre $58,74 \pm 0,11$ et $66,71 \pm 0,12$ KJ mol⁻¹) supérieure à celles des variétés Safari, Gandiol F1 et Orient F1 (comprises entre $47,63 \pm 0,28$ et $59,12 \pm 0,13$ KJ mol⁻¹). Ces valeurs sont comparables aux résultats trouvés dans les études existantes pour certains produits alimentaires tels que le gombo, le haricot vert et les feuilles d'olives [117], [119], [125]. Les analyses statistiques sur l'énergie d'activation, montrent qu'aussi bien au sein de chaque variété qu'entre les variétés, les valeurs de p sont supérieures à 5 %. Ces résultats traduisent l'absence de différence significative. Toutefois, la variété Violet de Galmi se différencie des trois autres variétés avec des valeurs de p comprises entre 0,12 et 0,62.

Par conséquent, plus le degré de maturité du produit est important, plus l'eau dans le produit est liée, plus le coefficient de diffusivité effective est petit, plus l'énergie d'activation est faible [58], [66], [115], [125], [126].

En résumé, les coefficients de diffusivité effective des variétés augmentent avec la température et diminuent avec le degré de maturité, et l'énergie d'activation baisse avec le degré de maturité. L'énergie d'activation et les coefficients de diffusivité effective de la variété Violet de Galmi sont supérieurs à ceux des trois autres variétés :

- ❖ Pour Violet de Galmi : coefficient de diffusivité effective compris entre $2,25 \cdot 10^{-11}$ et $1,32 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, et l'énergie d'activation varie entre 58,74 et 66,71 KJ mol⁻¹ ;
- ❖ Pour les variétés Safari, Gandiol F1, et Orient F1 : coefficient de diffusivité effective compris entre $1,30 \cdot 10^{-11}$ et $9,77 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, et l'énergie d'activation située entre 47,63 et 59,12 KJ mol⁻¹.

Il est ainsi possible d'envisager un mélange des trois variétés lors du séchage quelle que soit la température car leurs énergies d'activation et leurs coefficients de diffusivité effective sont sensiblement identiques. Dans le cas d'un mélange des quatre variétés, bien que les différents tests statistiques ne reflètent pas de différence significative (exceptée entre les variétés Violet de Galmi et Orient F1), la variété Violet de Galmi, dont l'énergie d'activation est la plus élevée, est la variété limitante.

II.5 COMPARAISON DU SÉCHAGE A L'ÉTUVE AU SÉCHAGE EN SERRE SOLAIRE

La production de poudre d'oignon semble être une excellente opportunité pour réduire les pertes post-récoltes. Toutefois, la transformation des variétés locales d'oignon n'est à ce jour pas développée au Sénégal du fait de la forte consommation énergétique et de la non-maîtrise du procédé de déshydratation. L'usage du séchage solaire comme levier majeur pour pallier cette contrainte énergétique se justifie par :

- ❖ les résultats intéressants tant sur le plan énergétique que sur la préservation de la qualité des produits, obtenus par de précédents travaux de recherche sur le séchage solaire [68], [69], [71] ;
- ❖ le fort potentiel solaire dont bénéficie le Sénégal de par sa position géographique.

L'objectif de ce travail consiste à mettre au point un procédé de séchage permettant de réduire la facture énergétique, de le comparer au séchage convectif électrique reconnu. Les conditions optimales de séchage sont déterminées par l'étude de l'impact de ce procédé à l'étuve et en serre solaire sur quelques paramètres biochimiques et physico-chimiques majeurs.

II.5.1 MATÉRIELS

II.5.1.1 MATÉRIEL VÉGÉTAL

L'oignon local est collecté au niveau de la coopérative de Rao, Saint-Louis (Sénégal). Les variétés étudiées sont le Violet de Galmi, le Safari, le Gandiol F1 (Gandiolois) et l'Orient F1 (Orient) avec un degré de maturité de 85 % de tombaison des feuilles à la récolte.

Le matériel végétal et la préparation sont présentés au niveau des sous-chapitres *II.2.1* et *II.2.2*.

II.5.1.2 MATÉRIELS DE SÉCHAGE ET D'ANALYSE

Les matériels d'analyse et de séchage utilisés sont :

- ❖ une étuve de marque MEMMERT avec une précision de 0,1 °C;
- ❖ une serre solaire munie d'un système de ventilation pour réguler la température et l'humidité ;
- ❖ des capteurs pour mesurer la température et l'humidité ;
- ❖ un anémomètre de marque TFA Dostmann (précision de 0,05 m / s) ;
- ❖ un thermohygromètre de marque voltcraft (précision 1 °C et 3,5 %) ;
- ❖ un awmètre de marque Rotronic HP 23 ;
- ❖ un spectrophotomètre de marque Specord ;
- ❖ un pH mètre de marque HI 23 ;
- ❖ une balance de précision de marque Denver instrument (précision 0,0001 g) ;

- ❖ un micromètre de marque RS PRO, à lecture digital (plage de lecture 0 à 25 mm, précision 0,001) ;
- ❖ des capsules en pyrex, des claies de séchage et la verrerie de laboratoire.

II.5.1.3 OUTILS GRAPHIQUES ET D'ANALYSES STATISTIQUES

Les logiciels utilisés pour l'exploitation des données :

- ❖ le logiciel R version 3.4.0 (Team R Core, 2017) a été utilisé pour le test de comparaison entre les deux méthodes de séchage, les analyses de variance et de concordances des mesures;
- ❖ le logiciel Excel version 2016 est utilisé en tant qu'outil de calculs scientifiques pour les représentations graphiques.

II.5.2 MÉTHODES

II.5.2.1 CARACTÉRISTIQUES MAJEURES DES VARIÉTÉS D'OIGNON

Les caractéristiques majeures des quatre variétés d'oignon sur lesquelles s'appuie cette comparaison des deux modes de séchage sont l'humidité, l'activité de l'eau, la teneur en polyphénols, le pH et l'acidité titrable. Les méthodes d'analyse utilisées sont présentées au niveau des sous-chapitres *II.3.2.1*, *II.3.2.2*, *II.3.2.7*, *II.3.2.8* et *II.3.2.9*.

II.5.2.2 ÉTABLISSEMENT DES CINÉTIQUES DE SÉCHAGE

L'étude et l'optimisation des cinétiques de séchage des variétés d'oignon local sont faites par la méthode gravimétrique. Les épaisseurs des échantillons sont comprises entre 1,06 et 2,33 mm [114]–[116]. Aussi bien à l'étuve qu'en serre solaire, les expériences sont réalisées en triple. Le suivi de la perte de poids s'effectue toutes les heures jusqu'à l'atteinte d'un poids constant et l'activité de l'eau également est mesurée. L'humidité de stabilité visée pour les produits séchés est inférieure ou égale à 8 % [127]–[129].

La teneur en eau initiale (X_0) et celle après chaque heure de séchage ($X_{exp,t}$) sont déterminées par dessiccation à 105 °C pendant deux heures de temps et sont calculées respectivement d'après l'*Équation 23* et l'*Équation 24*.

Les expériences de séchage ont été réalisées en utilisant une étuve et une serre solaire afin de déterminer si les deux procédés permettent d'obtenir des cinétiques de séchage identiques ou l'un des deux est plus efficient tout en conservant la qualité du produit.

II.5.2.2.1 PLAN DE SECHAGE A L'ETUVE

Tout d'abord, des essais sont menés à l'étuve dans la plage de température allant de 50 °C à 70 °C avec un pas de 5 °C afin de déterminer les couples température / temps optimaux permettant d'obtenir des produits stables [16], [19], [98], [113].

Dix grammes sont prélevés sur les oignons hachés de trois bulbes différents, étalés dans des coupelles en pyrex. Les expériences sont réalisées avec ventilation à une vitesse de l'air fixée à 2,4 m / s et une humidité relative entre 10 % et 15 % [16], [19], [91], [95], [98]. Une photo de l'étuve avec les coupelles pour l'étude de la cinétique ainsi que les plateaux pour la production des échantillons est exposée sur la **Figure 24**.

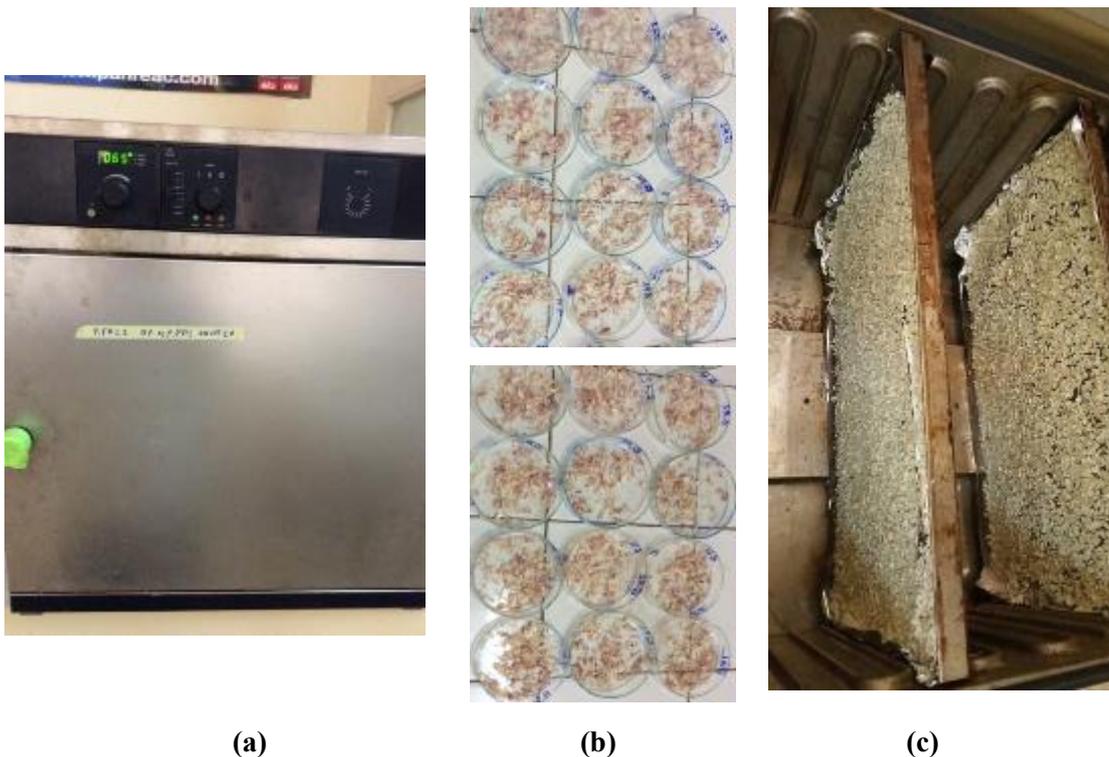


Figure 24 : (a) Photo de l'étuve (b) les coupelles pour le suivi de la cinétique (c) les plateaux pour la production des échantillons de poudres d'oignon.

II.5.2.2.2 PLAN DE SECHAGE EN SERRE SOLAIRE

Les quatre variétés sont mises à sécher simultanément dans la serre. Au total 12 kg d'oignons hachés de chaque variété sont répartis sur les claies (une variété par claie). Chaque claie est quadrillée en quatre parties de dimension égale (0,74 X 0,71 m) sur lesquelles quatre kg d'oignon sont étalés en monocouche (1 compartiment non utilisé car nous ne disposons pas assez de matières premières). La **Figure 25** présente une vue d'extérieur de la serre solaire et une claie contenant de l'oignon en cours de séchage.

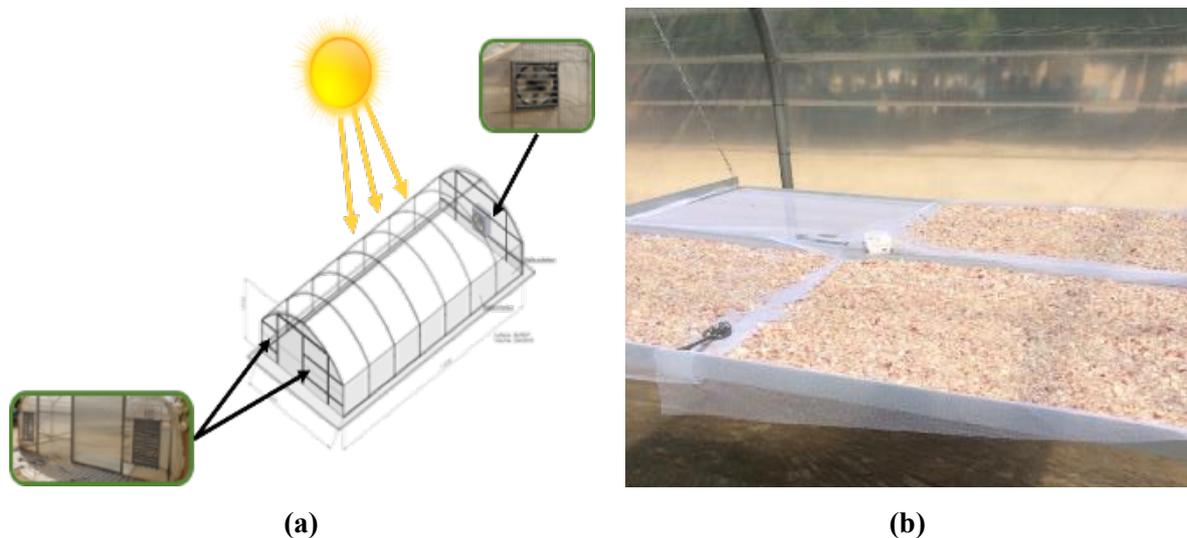


Figure 25 : (a), Photo de la serre solaire vue de l'extérieur avec le système de ventilation et d'extraction de l'air et (b), photo d'une claie de séchage avec les oignons répartis en fine couche.

A l'intérieur de la serre des capteurs d'ambiance amovibles permettent de suivre l'évolution de la température et l'humidité relative, deux paramètres déterminants pour le séchage. Au cours du séchage en serre solaire, l'humidité relative oscille entre 10 % et 60 %, et la température varie entre 35 °C et 65 °C.

II.5.2.3 ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

Les analyses biochimiques et physico-chimiques effectuées aussi bien sur les matières premières que sur les poudres d'oignon obtenues par déshydratation à l'étuve et en serre sont le pH (méthode NF V76-122 : 1994, NF EN 1132), l'acidité titrable (méthode NF V 05-101 janvier 1974, Norme Européenne EN 12147 Décembre 1996), la teneur en eau (méthode NF ISO 712 : 2009), l'activité de l'eau (méthode NF EN ISO 17025) et la teneur en polyphénols (méthode de dosage spectrophotométrique au réactif de Folin-Ciocalteu). Toutes les mesures d'humidité et analyses de caractérisation sont réalisées en triple afin de s'assurer de la répétabilité.

II.5.2.4 ANALYSES STATISTIQUES

L'évaluation de la reproductibilité et de la répétabilité des mesures est faite par la méthode numérique qui est le coefficient de LIN [130]. Le coefficient de concordance de Lin varie entre -1 et 1, où les valeurs -1, 0 et +1 signifie respectivement une discordance parfaite, une concordance nulle et une concordance parfaite.

Le test paramétrique de Student est utilisé pour la comparaison des caractéristiques (activité de l'eau, acidité titrable, pH et teneur en polyphénols) des variétés d'oignon avant séchage, des humidités de stabilité des échantillons séchés à l'étuve et celles séchés en serre solaire.

Toutes les analyses statistiques sont effectuées avec un seuil significatif de $p < 5 \%$.

II.5.3 RÉSULTATS

II.5.3.1 CARACTÉRISTIQUES MAJEURES DES ÉCHANTILLONS D'OIGNON AVANT SÉCHAGE

Les caractéristiques physico-chimiques des échantillons avant séchage sont présentées dans le **Tableau XVIII**. Toutes les variétés sont marquées par une forte teneur en eau et des valeurs d'Aw, de pH et de polyphénols quasiment identiques. Seule l'acidité de la variété Safari semble se démarquer (9,23 mEq / 100 g ms) de celle des autres variétés (entre 4 et 6 mEq / 100 g ms). Les deux critères les plus déterminants pour la stabilité des produits alimentaires, notamment la teneur en eau (%) et l'activité de l'eau des oignons frais sont respectivement pour le :

- ❖ Violet de Galmi $85,56 \pm 0,60 / 0,945 \pm 0,01$;
- ❖ Safari $88,11 \pm 0,61 / 0,950 \pm 0,001$;
- ❖ Gandiol F1 $86,99 \pm 0,10 / 0,940 \pm 0,001$;
- ❖ Orient F1 $89,13 \pm 0,69 / 0,947 \pm 0,009$.

Tableau XVIII : Caractéristiques majeures des échantillons d'oignon avant séchage.

Variétés	Violet de Galmi	Safari	Gandiol F1	Orient F1
Humidité (% bh)	85.56 ± 0.60	88.11 ± 0.61	86.99 ± 0.10	89.13 ± 0.69
Activité de l'eau (aw)	0.945 ± 0.011	0.950 ± 0.001	0.940 ± 0.013	0.947 ± 0.009
Polyphenols (g EAG / 100 g ms)	0.111 ± 0.0040	0.134 ± 0.0065	0.162 ± 0.0016	0.312 ± 0.0041
Acidité (mEq / 100 g ms)	6.12 ± 0.00	9.23 ± 0.00	4.51 ± 0.02	6.13 ± 0.38
pH (10 %)	6.42 ± 0.03	6.29 ± 0.06	6.35 ± 0.03	6.37 ± 0.03

Légende : base humide (bh), Équivalent Acide Gallique (EAG).

II.5.3.2 CONDITIONS OPTIMALES DE SÉCHAGE

Les coefficients de Lin obtenus pour le test de concordance des mesures en serre solaire et à l'étuve pour toutes les températures confondues varient entre 0,9993555 et 0,9999317 avec un intervalle de confiance de [0,9991869 ; 0,9999431]. Ceci indique qu'il existe une parfaite concordance entre les trois mesures effectuées pour chaque essai.

Les résultats du test statistique pour la comparaison des données de la cinétique de séchage à l'étuve à celle en serre solaire sont compris entre [-0,44906 - 0,73362] pour le paramètre de Student (t), [0,4697 - 0,9572] pour le pvalue et [24 - 26] pour le degré de liberté (df). Par conséquent, quelle que soit la température de séchage à l'étuve, les valeurs de $p > 5\%$ montrent

qu'il n'existe pas de différence significative entre les cinétiques de séchage à l'étuve et celles en serre solaire.

La stabilité des fruits et légumes séchés est garantie avec une teneur en eau inférieure ou égale à $8 \pm 2 \%$ et une A_w comprise entre 0.5 et 0.6 pour éviter toute activité microbienne [127], [131]–[133]. Ces valeurs servent de référence pour déterminer les conditions optimales de séchage en tenant compte de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques après séchage.

II.5.3.2.1 CONDITIONS OPTIMALES DE SECHAGE A L'ETUVE

La **Figure 26** présente l'évolution de la teneur en eau des variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 séchées à l'étuve aux différentes températures.

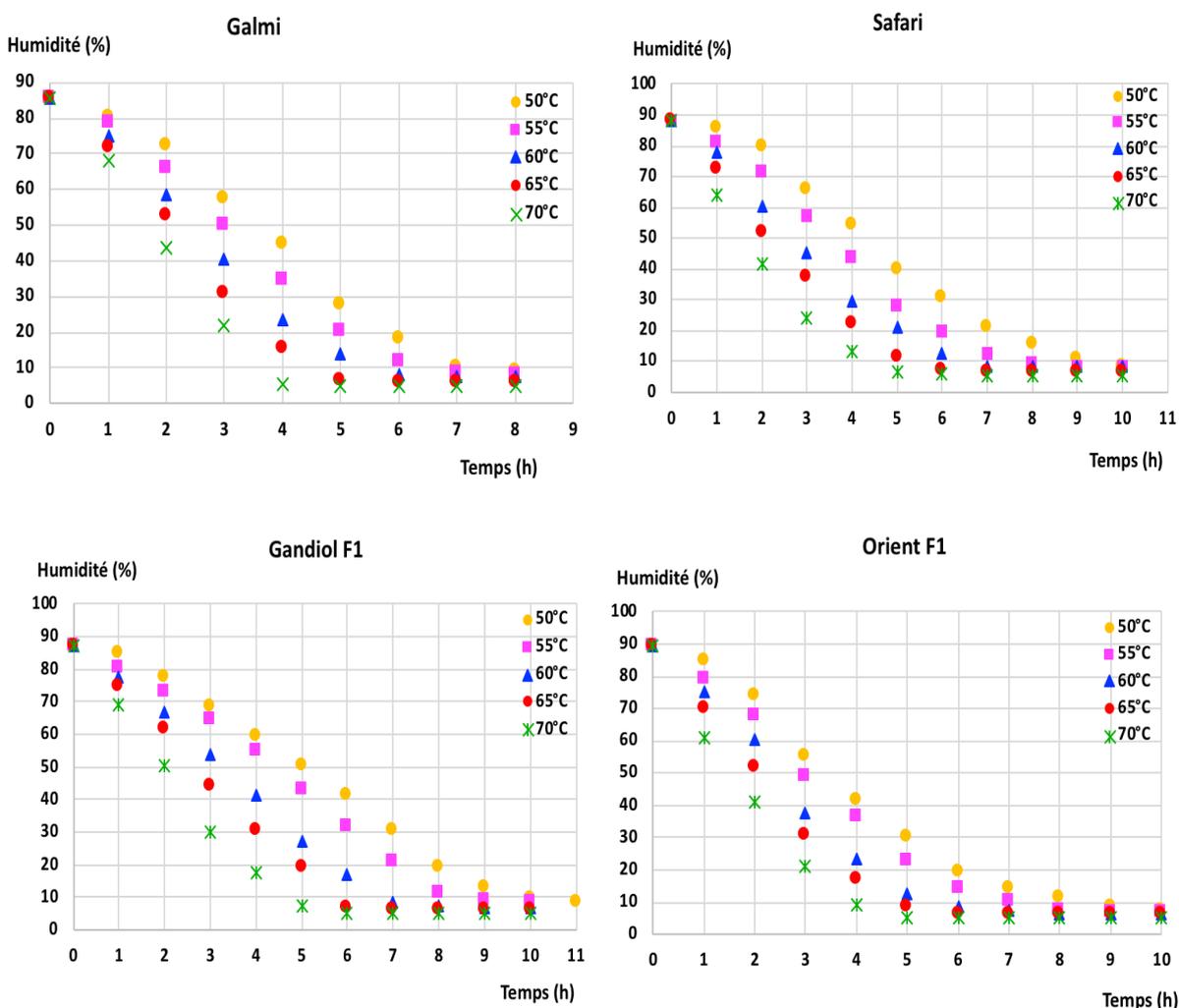


Figure 26 : Évolution de la teneur en eau des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 séchées à l'étuve aux différentes températures.

Le temps optimal de séchage à l'étuve garantissant l'atteinte de l'humidité de stabilité évolue inversement à l'augmentation de la température. Sur la plage de températures comprises entre 50 °C et 70 °C, les résultats (**Figure 26**) obtenus pour les quatre variétés sont les suivants :

- ❖ la teneur en eau initiale du Violet de Galmi ($85,56 \pm 0,60$ %), baisse à une humidité de stabilité située entre $8,89 \pm 0,16$ et $5,23 \pm 0,34$ (%) pour un temps optimal entre 4h et 8h selon la température de séchage. A chaque augmentation de la température (+ 5 °C), le temps de séchage diminue (-1h) ;
- ❖ avec une teneur en eau initiale de $88,11 \pm 0,61$ (%), l'humidité de stabilité de la variété Safari, comprise entre $8,14 \pm 0,52$ et $6,30 \pm 0,26$ (%) selon la température de séchage, est atteinte pour un temps optimal situé entre 10h et 5h. Le temps de séchage baisse (-1h) à chaque augmentation de la température (+5 °C) excepté de 55 °C à 60 °C où le pas de temps est de (-2h) ;
- ❖ la variété Gandiol F1 dont la teneur en eau initiale est de $86,99 \pm 0,10$ (%) présente une humidité de stabilité comprise entre $8,68 \pm 0,33$ et $7,70 \pm 0,39$ (%) selon la température de séchage. Le temps optimal de séchage varie entre 11h et 5h avec un pas de (-2h) pour chaque augmentation d'un pas de 5 °C dans la plage de températures allant de 50 °C à 60 °C et (-1h) pour celle allant de 60 °C à 70 °C ;
- ❖ pour la variété Orient avec une teneur en eau initiale de $89,13 \pm 0,69$ (%), l'humidité de stabilité se situe entre $8,54 \pm 0,41$ et $5,02 \pm 0,24$ (% ms) en fonction de la température de séchage. Le temps optimal de séchage est compris entre 9h et 5h avec une variation de (-1h) pour chaque augmentation de la température d'un pas de 5 °C dans la plage 50 °C à 60 °C, de (-2h) dans la plage de 60 °C à 65 °C et aucune variation dans celle de 65 °C à 70 °C.

Pour chacune des variétés, la température optimale et la durée optimale du séchage sont déterminées en tenant compte de l'évolution de la teneur en eau et de l'activité de l'eau [17], [18], [134], [135], ainsi que de l'impact du procédé sur les polyphénols lesquels présentent un certain nombre d'intérêts thérapeutiques [30], [41], [43]. [24], [42], [136].

II.5.3.2.2 CONDITIONS OPTIMALES DE SECHAGE EN SERRE SOLAIRE

La **Figure 27** présente l'évolution de la teneur en eau des variétés d'oignon séchées en serre solaire à des températures variables au cours du séchage.

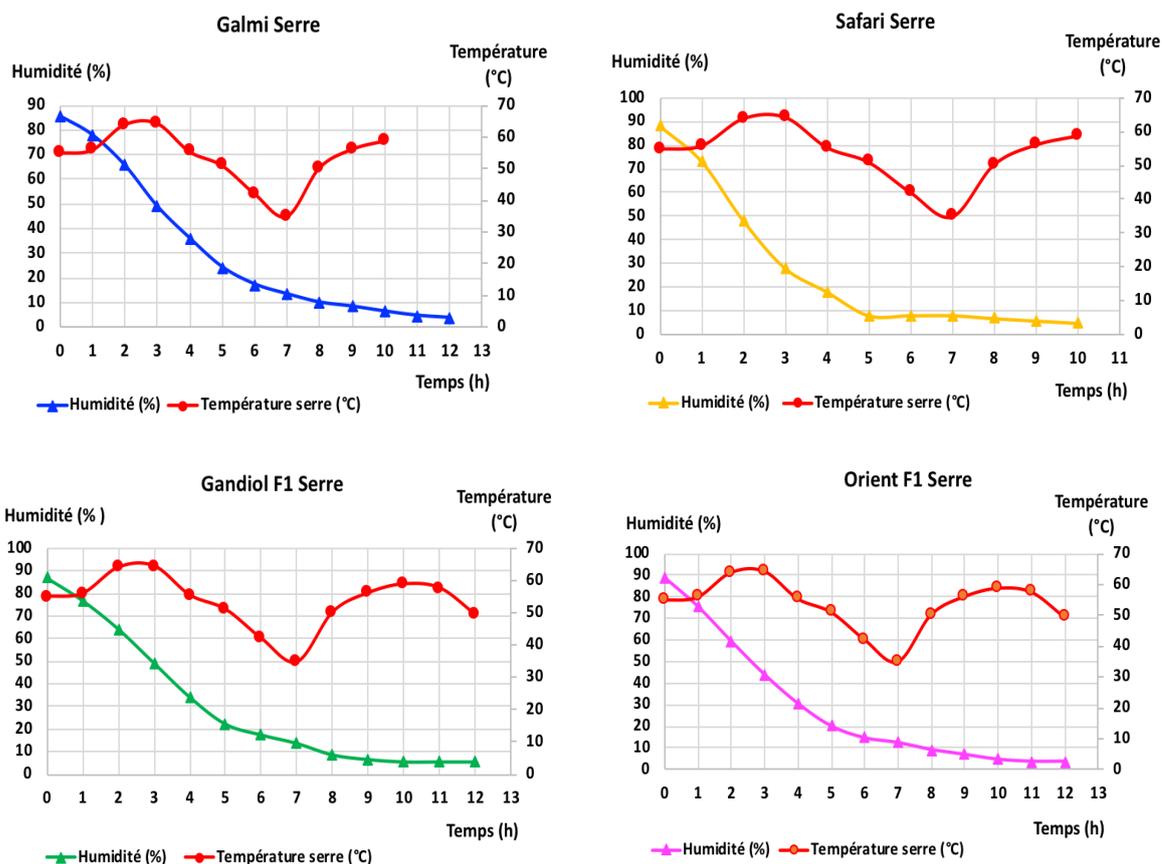


Figure 27 : Évolution de la teneur en eau des quatre variétés d'oignon séchées en serre solaire à des températures variables au cours du séchage

Le séchage des oignons en serre solaire contrairement à l'étuve dépend de l'ensoleillement. Ainsi, au cours des essais la température et l'humidité dans la serre solaire ont varié dans les intervalles respectifs de 35 °C à 65 °C et 10 % à 60 %. Afin d'atteindre les teneurs en eau de stabilité des produits, le séchage est effectué sur deux jours du fait de la variabilité de la température dans la serre solaire liée aux conditions météorologiques. L'allure des cinétiques de séchage des quatre variétés sont sensiblement identiques. La **Figure 27** fait apparaître que les valeurs d'humidité de stabilité sont atteintes à partir de 8h de séchage en serre solaire et qu'à partir de 10h les valeurs sont quasi stables. Les différentes teneurs en eau pour les temps de séchage de 8h à 10h sont présentées dans le **Tableau XIX**.

Tableau XIX : Temps de séchage à la serre et teneur en eau des échantillons séchés.

Variétés	Humidité (% ms)		
	Temps de séchage		
	8h	9h	10h
Violet de Galmi	9.89 ± 3.034	8.23 ± 2.004	6.23 ± 2.465
Safari	6.88 ± 2.107	5.88 ± 0.195	4.88 ± 0.088
Gandiol F1	8.54 ± 2.620	6.49 ± 2.253	5.45 ± 0.954
Orient F1	9.17 ± 4.18	6.89 ± 1.045	4.66 ± 1.193

Les teneurs en eau sont inversement proportionnelles aux temps de séchage en serre et l'élimination de l'eau est différente selon les variétés. Ces résultats sont à confronter avec les valeurs d'Aw et de polyphénols afin de déterminer le temps optimal de séchage.

II.5.3.3 CHOIX DE LA PLAGE IDÉALE DE SÉCHAGE

II.5.3.3.1 CARACTERISTIQUES MAJEURES DES ECHANTILLONS SECHES A L'ETUVE

L'activité de l'eau (Aw), l'acidité titrable et le pH sont des caractéristiques du milieu tout aussi importantes dans la stabilisation des produits alimentaires que la teneur en eau. Pour éviter toute activité microbienne, une Aw comprise entre 0,5 et 0,6 est nécessaire. Par ailleurs, plus le milieu est acide (pH inférieur à 4,5), plus cela est défavorable aux réactions de dégradation chimiques et biochimiques [131], [132], [134].

II.5.3.3.1.1 ÉVOLUTION DE L'ACTIVITE DE L'EAU

L'évolution de l'activité de l'eau pour les quatre variétés (**Figure 28**) montre que l'Aw initiale située entre 0,940 et 0,950 décroît avec l'augmentation de la température de séchage. L'Aw atteint des valeurs comprises entre 0,362 et 0,447 à 60 °C. Par ailleurs, les valeurs d'Aw des échantillons pour les températures 65 °C et 70 °C restent relativement stables dans cet intervalle, excepté pour la variété Orient à 65 °C (0,497).

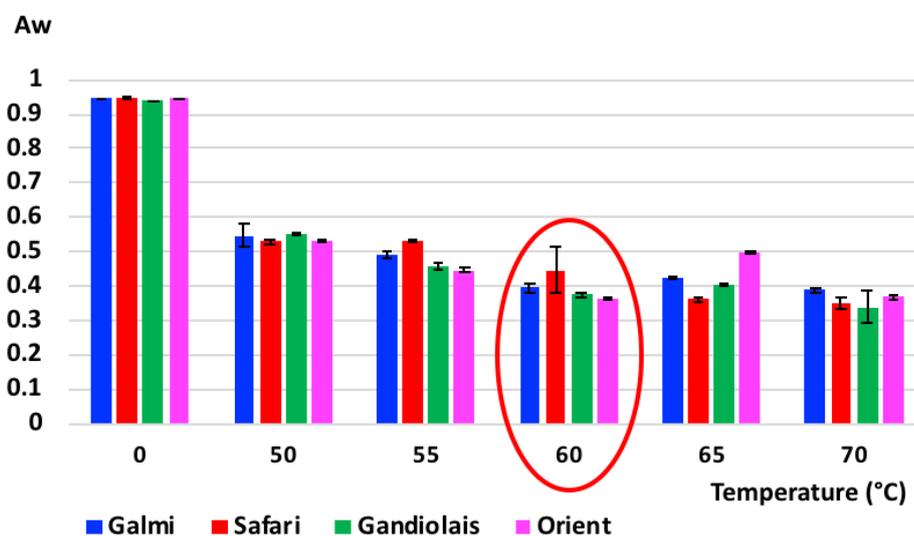


Figure 28 : Activité de l'eau des échantillons après séchage aux conditions optimales à l'étuve

II.5.3.3.1.2 ÉVOLUTION DE L'ACIDITE TITRABLE ET DU PH

Le suivi de l'acidité titrable et du pH à 10 % des échantillons séchés à l'étuve (**Figure 29**) indique qu'avec l'augmentation de la température de séchage les valeurs initiales (**Tableau XVIII**) d'acidité titrable et de pH à 10 % des quatre variétés comprises respectivement entre 4,51 et 9,23 mEq / 100 g (ms) et 6,29 et 6,42 évoluent inversement pour les quatre variétés. Toutefois, sur la

plage de température de 50 °C à 70 °C, la différence n'est pas significative aussi bien pour l'acidité titrable que pour le pH (toutes les valeurs de p pour le test de Student sont supérieures à 0,05).

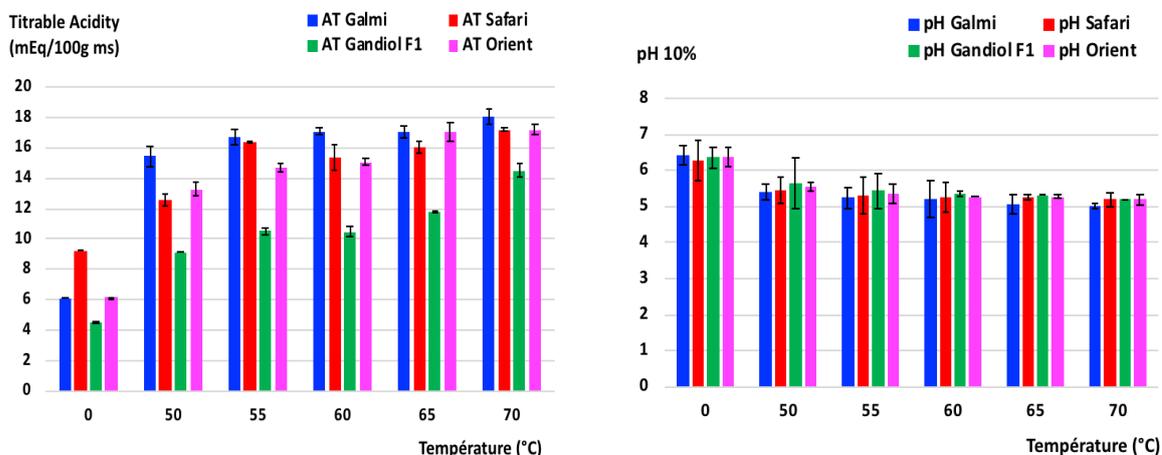


Figure 29 : Acidité titrable et pH des échantillons après séchage à l'étuve à différentes températures.

II.5.3.3.1.3 ÉVOLUTION DE LA TENEUR EN POLYPHENOLS

Les teneurs initiales en polyphénols totaux (**Tableau XVIII**) des quatre variétés, comprises entre 0,111 et 0,312 g EAG / 100 g (ms), augmentent avec la température de séchage (**Figure 30**). L'augmentation de la teneur en polyphénols totaux est à son maximum à la température de 60 °C avec 0,546 g EAG / 100 g (ms) pour le Violet de Galmi ; il est de 0,837 g EAG / 100 g (ms) pour le Safari, 0,694 g EAG / 100 g ms pour le Gandiol F1 et 0,691 g EAG / 100 g (ms) pour l'Orient F1.

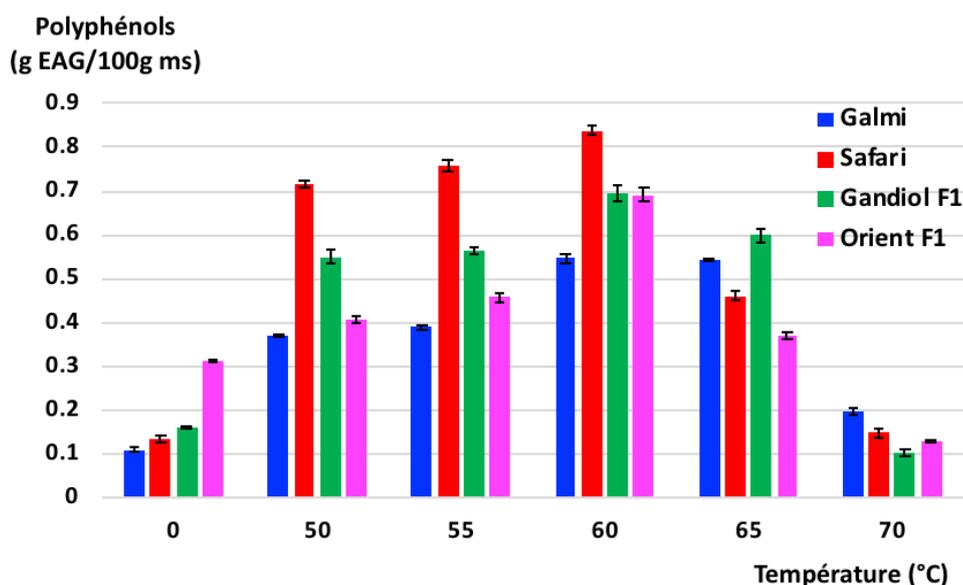


Figure 30 : Teneur en polyphénols après séchage à l'étuve à différentes températures.

L'impact de la température sur la teneur en polyphénols est similaire à celui trouvé dans la littérature [30], [43]. En effet, les polyphénols augmentent avec la température des modes de

préparation entraînant une évaporation de l'eau. Toutefois, selon les produits et la nature des polyphénols, il existe une température limite au-delà de laquelle les polyphénols sont altérés. Pour les quatre variétés d'oignon (**Figure 30**), à partir de 65 °C, une diminution de l'ordre de 0,3 % allant à 37 % est observée. Cette baisse s'accroît à 70 °C montrant ainsi l'impact négatif de la température sur les polyphénols.

II.5.3.3.2 CARACTERISTIQUES MAJEURES DES ECHANTILLONS SECHES EN SERRE SOLAIRE

Dans les conditions de séchage en serre solaire avec les intervalles respectifs de température et d'humidité dans la serre de 35 °C à 65 °C et 10 % à 60 %, l'activité de l'eau initiale (**Tableau XVIII**) des échantillons décroît au bout de 8h de séchage. Les valeurs d'activité de l'eau des quatre variétés d'oignon séchées se situent entre 0,577 et 0,675 (**Tableau XX**). Ces résultats sont dans la fourchette permettant d'éviter toute activité microbienne [131], [132], [134].

Cette décroissance de l'activité de l'eau des variétés se poursuit avec l'augmentation du temps de séchage en serre solaire. Ainsi, pour un temps de séchage de 9h, les valeurs de l'activité de l'eau des échantillons se situent entre 0,505 et 0,550, tandis qu'au terme de 10h de séchage, elles sont entre 0,415 et 0,491.

Tableau XX: *Activité de l'eau des échantillons séchés en serre solaire aux différents temps de séchage permettant d'atteindre les valeurs d'humidité de stabilité.*

Activité de l'eau (Aw)			
Temps de séchage			
Variétés	8h	9h	10h
Violet de Galmi	0,577 ± 0,007	0,538 ± 0,003	0,469 ± 0,012
Safari	0,589 ± 0,003	0,505 ± 0,005	0,477 ± 0,000
Gandiol F1	0,675 ± 0,041	0,550 ± 0,018	0,415 ± 0,012
Orient F1	0,617 ± 0,008	0,536 ± 0,005	0,491 ± 0,006

Les teneurs en eau des échantillons séchés en serre solaire à différents temps (**Tableau XIX**) montrent que le temps optimal de séchage est de neuf heures pour les variétés Violet de Galmi et Orient F1 et de huit heures pour les variétés Safari et Gandiol F1. A ces temps optimaux, les valeurs de l'activité de l'eau comprises entre 0,536 et 0,675 (**Tableau XX**) garantissent l'absence de toute activité microbienne. Les valeurs du pH, de l'acidité titrable et des polyphénols des produits séchés dans ces conditions optimales en serre solaire sont présentées dans le **Tableau XXI**.

Tableau XXI : pH, acidité titrable et teneur en polyphénols des échantillons séchés en serre solaire dans les conditions optimales (T °C 35-65 °C, HR 10-60 %, temps 8-9h).

Variétés	Temps optimal (h)	pH (10 %)	Acidité titrable (mEq / 100 g ms)	Polyphénols (g /100 g ms)
Violet de Galmi	9	5,52 ± 0,14	47,43 ± 5,035	0,530 ± 0,003
Safari	8	5,56 ± 0,03	48,60 ± 1,018	0,720 ± 0,003
Gandioli F1	8	5,35 ± 0,03	34,89 ± 0,198	0,505 ± 0,009
Orient F1	9	5,48 ± 0,10	48,760 ± 2,432	0,607 ± 0,005

Aux temps optimaux de 9h pour les variétés Violet de Galmi et Orient F1 et de 8h pour les variétés Safari et Gandiol F1, les caractéristiques des produits séchés en serre solaire (**Tableau XXI**), comparées aux valeurs initiales (**Tableau XVIII**), reflètent que :

- ❖ l'acidité titrable augmente avec la température de séchage alors que le pH à 10 % évolue inversement pour les quatre variétés. L'acidité titrable des variétés séchées en serre varie entre $34,89 \pm 0,198$ et $48,760 \pm 2,432$ mEq / 100 g ms (facteur multiplicatif de l'acidité titrable initiale compris entre 5,26-7,95). Quant aux pH, les valeurs sont de l'ordre de $5,35 \pm 0,03$ à $5,56 \pm 0,03$ (facteur multiplicatif du pH initial allant de 0,84 à 0,88) ;
- ❖ les teneurs en polyphénols augmentent également avec le séchage. Les quantités initiales en polyphénols des variétés Violet de Galmi ($0,096 \pm 0,0040$ g EAG / 100 g ms), Safari ($0,134 \pm 0,0065$ g EAG / 100 g ms) Gandiolais ($0,162 \pm 0,0016$ g EAG / 100 g ms) et Orient ($0,312 \pm 0,0041$ g EAG / 100 g ms) sont respectivement multipliées par un facteur 5,48 ; 5,37 ; 3,10 et 1,94 94 dans les conditions optimales de séchage en serre solaire.

Les photos des poudres d'oignon obtenue après séchage à l'étuve aux températures de 60 °C, 65 °C et 70 °C ainsi que celles obtenues après séchage en serre solaire en 8h, 9h et 10h de temps sont présentés sur la **Figure 31**.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figure 31 : Poudres d'oignon obtenues après séchage de la variété Violet de Galmi à l'étuve [(a) 60 °C, (b) 65 °C et (c) 70 °C] et en serre solaire [(d) 8h, (e) 9h et (f) 10h].

Plus la température et la durée de séchage augmentent plus la couleur des poudres obtenues est foncée. Cette modification est due aux réactions de brunissement :

- ❖ soit enzymatique lié à la conversion des composés phénoliques en polymères colorés faisant intervenir la polyphénol-oxydase ;
- ❖ soit non enzymatique dite réaction de Maillard faisant intervenir les SR et les groupements aminés des acides aminés des peptides ou de protéines. Selon les aliments, les produits de cette réaction peuvent avoir des effets désirables (arômes, pigments, antioxydants) ou indésirables (mutagène, antinutritionnel).

Toutefois, la réaction de Maillard semble être majoritairement responsable du changement de couleur du fait de l'action de blocage irréversible de la polyphénol-oxydase par les composés soufrés présents dans les oignons.

II.5.4 DISCUSSION

Les coefficients de concordance de LIN obtenus pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 à l'état frais et séchés aussi bien à l'étuve qu'en serre solaire sont tous de l'ordre de 0,999 (proches de 1). Une parfaite répétabilité des mesures est donc observée.

Concernant le séchage à l'étuve, la plage de température 50 °C à 70 °C avec un temps de séchage optimal compris entre 4h et 11h permettent d'obtenir des valeurs d'Aw et de teneur en eau garantissant la stabilité du produit.

Cependant, l'impact de la température sur les polyphénols [30], [41], [43], constituants d'intérêts thérapeutiques [24], [42], [136], associé au phénomène de croûtage lorsque l'élimination de l'eau se fait trop rapidement et au brunissement des produits séchés, permettent d'écarter les températures supérieures à 65 °C pour le séchage des oignons. Par ailleurs, les températures inférieures ou égales à 50 °C ne sont pas indiquées du fait des temps d'exposition trop longs consommant non seulement beaucoup d'énergie, mais altérant également la qualité du produit. A cet effet, les meilleurs couples températures / temps sont 55 à 65 °C / 6h à 8h avec un optimum à 60 °C à l'étuve. A cet optimum de température avec un temps de séchage de 6h pour la variété Violet de Galmi et de 7h pour les variétés Safari, Gandiol F1 et Orient F1, la teneur en polyphénols des quatre variétés est à son maximum (comprise entre 0,546 et 0,837 g EAG / 100 g (ms). Les produits séchés dans ces conditions optimales à l'étuve ont une activité de l'eau de l'ordre de 0,4 et une teneur en eau respectivement pour les variétés Violet de Galmi, Orient F1, Safari et Gandiol F1 de 7,96 %; 7,17 %; 8,42 % et 8,67 %. Avec ces valeurs d'humidité et d'Aw, les réactions biochimiques, physico-chimiques et le développement des microorganismes responsables de la périssabilité des produits sont alors inhibées [17], [131], [132].

Quant aux résultats obtenus par séchage en serre solaire présentés dans les tableaux ***Tableau XIX***, ***Tableau XX*** et ***Tableau XXI***, ils montrent que l'humidité et l'Aw de stabilité sont obtenues au bout de 8h à 9h de séchage avec une température dans la serre variant de 35 à 65 °C au cours de la journée. De plus, dans cette plage de température en serre solaire, les teneurs en polyphénols des quatre variétés d'oignon augmentent après séchage [30], [69]. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus à l'étuve.

Les résultats du test paramétrique de Student confirment qu'il n'existe pas de différence significative entre les cinétiques de séchage à l'étuve et celles en serre solaire dans les conditions de l'étude car toutes les valeurs de p sont > 5 %.

En somme, la réduction des fortes teneurs en eau et de l'activité de l'eau dans les oignons par séchage aussi bien à l'étuve qu'en serre solaire garantissent ainsi la stabilité des produits séchés. Par ailleurs, bien que le temps de séchage en serre solaire soit supérieur à celui à l'étuve, l'impact du séchage sur l'évolution de la teneur en polyphénols est sensiblement identique quelle que soit la source d'énergie. Ces résultats orientent le choix vers la source solaire pour la gestion des pertes post-récolte par le biais de la déshydratation des oignons.

Toutefois, le manque de contrôle des températures de séchage en serre solaire peut influencer sur la qualité nutritionnelle et organoleptique des oignons séchés. La modélisation des cinétiques de séchage, ainsi que l'établissement des isothermes de désorption permettraient de maîtriser les cinétiques de séchage et de montrer le gain énergétique obtenu en serre solaire.

II.6 MODÉLISATION DE LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE A L'ÉTUVE ET EN SERRE SOLAIRE

Le séchage implique des transferts de chaleur et de masse tant sur le plan interne des produits que sur le plan externe. Ces transferts pouvant, par ailleurs, altérer la qualité nutritionnelle et organoleptique des produits séchés, leur maîtrise constitue une des clefs pour préserver la qualité [24], [30], [41], [43], [136].

Plusieurs facteurs, tels que les conditions expérimentales, l'origine, la forme et la texture des produits, ont une influence sur ces transferts et rendent complexe l'étude microscopique des cinétiques de séchage [16], [91], [95], [98], [113]. Ainsi, certains chercheurs ont eu recours à la modélisation mathématique de ces transferts, soit séparément (Lewis en 1921 [53], Sherwood en 1929 [55] et Ceaglske et Hougen en 1937 [137]), soit de façon couplée (Philip et De Vries en 1957 [138] et Whitaker en 1977 [139]), pour en assurer le contrôle. Cependant, les modèles phénoménologiques portant sur les transferts simultanés de chaleur et de masse décrivent le mieux le processus de déshydratation. Ces modèles reposent sur des phénomènes physiques fondamentaux comme la théorie de la diffusion, la théorie capillaire et la thermodynamique des phénomènes irréversibles. La résolution de ces modèle fait référence à des méthodes statistiques de régression non linéaire [52], [65], [140]–[142]. Toutefois, ces modèles ne fournissent pas assez d'information sur le changement de forme des produits au cours du séchage. Leur validité dépend des conditions expérimentales, mais également des spécificités des produits et implique un certain nombre d'hypothèses.

Parmi ces travaux de recherche dans le cadre du séchage de produits alimentaires, peuvent être cités ceux sur la tomate [143], la banane [113], le Gombo, le gingembre et le manioc [58], l'oignon [16], [91], [95] et la carotte [52].

L'influence de l'origine des produits sur les cinétiques de séchage et le manque de données sur les variétés d'oignon du Sénégal dans les études publiées justifient l'initiation de ces travaux de recherches. L'objectif est d'optimiser et de maîtriser les cinétiques de séchage à l'étuve et en serre solaire de quatre variétés d'oignon par la modélisation et d'établir les courbes caractéristiques de séchage. Des modèles empiriques mathématiques sont testés dans le cadre de ce présent travail afin de déterminer quel est le meilleur modèle permettant de prédire les cinétiques de séchage sous différentes conditions expérimentales et de mieux maîtriser les coûts et la qualité.

II.6.1 MATÉRIELS

II.6.1.1 MATÉRIEL VÉGÉTAL

Le matériel végétal et sa préparation sont décrits dans les sous – chapitres *II.2.1* et *II.2.2*. Les quatre variétés étudiées sont le Violet de Galmi, le Safari, le Gandiol F1 et l’Orient F1. Le degré de maturité des quatre variétés d’oignon, exprimé en pourcentage de tombaison des feuilles au moment de la récolte, est supérieur à 85 % car l’énergie d’activation pour le séchage est moindre [144].

II.6.1.2 MATÉRIEL DE SÉCHAGE ET D’ANALYSE

Les matériels utilisés sont :

- ❖ une étuve avec une précision de 0,1 °C ;
- ❖ une serre solaire équipée d’un système de ventilation pour réguler la température et l’humidité de l’air ambiant ;
- ❖ des capteurs positionnés dans les quatre coins de la serre pour les relevés de température et d’humidité de l’air ambiant ainsi qu’au niveau des claies de séchage ;
- ❖ un anémomètre avec une précision de 0,05 m / s ;
- ❖ un thermohygromètre de précision 1 °C et 3,5 % ;
- ❖ un micromètre (0 -25 mm) avec une précision de 0,001 mm ;
- ❖ une balance de précision 0,0001 g ;
- ❖ des capsules en pyrex et la verrerie de laboratoire.

II.6.1.3 OUTILS D’ANALYSES STATISTIQUES ET DE MODÉLISATION

Les logiciels utilisés pour l’exploitation des données sont :

- ❖ le logiciel R version 3.4.0 (Team R Core, 2017) a été utilisé pour le test de comparaison entre les deux méthodes de séchage, les analyses de variance et de concordances des mesures ;
- ❖ le logiciel scilab version 6.0.0 est utilisé en tant qu’outil de calculs scientifiques pour calculer les paramètres des différents modèles, afin d’identifier le meilleur modèle pour la modélisation mathématique des cinétiques de séchage, de calculer les paramètres des différents modèles et d’établir la courbe caractéristique de séchage pour chaque variété.

II.6.2 MÉTHODES

II.6.2.1 ÉTUDE DES CINÉTIQUES DE SÉCHAGE A L'ÉTUVE ET EN SERRE SOLAIRE

La méthodologie est décrite au niveau du sous-chapitre *II.5.2.2*.

II.6.2.2 MODÉLISATION DES CINÉTIQUES DE SÉCHAGE

Les cinétiques de séchage en couche mince des quatre variétés d'oignon sont modélisées avec neuf modèles mathématiques empiriques. Les équations des modèles Lewis, Henderson et Pabis, Page, Logarithmique, Two-term, Two-term exponential, Approximation of diffusion, Verma *et al.*, Midilli *et al.* [52], [53], [68], [71], [145]–[147], permettent de calculer la teneur en eau réduite prédite ($X_{r\text{ pred}}$).

Quant à la teneur en eau réduite expérimentale ($X_{r\text{ exp}}$), elle est calculée par la formule ci-après :

$$X_{r\text{ exp},t} = \frac{X_{\text{exp},t} - X_{\text{eq}}}{X_0 - X_{\text{eq}}} \quad \text{Équation 30}$$

Avec $X_{r\text{ exp},t}$: la teneur en eau réduite expérimentale aux différents temps de séchage ;

X_0 : la teneur en eau initiale (*Équation 23*) ;

$X_{\text{exp},t}$: la teneur en eau aux différents temps de séchage (*Équation 24*) ;

X_{eq} : la teneur en eau à l'équilibre, faible devant X_{exp} et X_0 , est négligée.

Les équations des modèles appliqués dans le cadre de la modélisation des cinétiques de séchage des quatre variétés d'oignon sont présentées dans le *Tableau XXII*.

Les paramètres des modèles sont estimés par une régression non linéaire avec le logiciel Scilab.

La méthode des moindres carrés est utilisée pour déterminer le meilleur modèle à savoir celui dont le coefficient de détermination R^2 est le plus proche de 1 à savoir une dispersion moindre des données. L'adéquation entre les données expérimentales et celles prédites par le meilleur modèle est déterminée par le test du chi deux (χ^2) dont la valeur doit être la plus proche de 0. Les formules sont les suivantes :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{r\text{ pred},i} - \overline{X_{r\text{ exp}}})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{r\text{ exp},i} - \overline{X_{r\text{ exp}}})^2} \quad \text{Équation 31}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{r\text{ exp},i} - X_{r\text{ pred},i})^2}{n_{\text{exp}} - N} \quad \text{Équation 32}$$

Avec n_{exp} : le nombre de données expérimentales

N : le nombre de paramètres de chaque modèle

Les vitesses de séchage des quatre variétés d'oignon aux différentes températures sont tracées en dérivant les équations des meilleurs modèles.

$$\frac{dX_r \text{pred}}{dt} = f(t)$$

Équation 33

Tableau XXII: Équations des modèles mathématiques appliqués à la modélisation de la cinétique de séchage des variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.

Nom du modèle	Expression du modèle	Référence	Nombre de constantes des modèles (N)
Lewis	$X_r = e^{-k t}$	[53]	1
Henderson and Pabis	$X_r = a e^{-k t}$	[145], [148]	2
Page	$X_r = e^{-k (t)^n}$	[149]	2
Logarithmique	$X_r = a e^{(-k t)} + c$	[150]	3
Two-term	$X_r = a e^{(-k_0 t)} + b e^{(-k_1 t)}$	[143]	4
Two-term exponential	$X_r = a e^{(-k t)} + (1 - a)e^{(-k a t)}$	[71], [151]	2
Approximation of diffusion	$X_r = a e^{(-k t)} + (1 - a) e^{(-k b t)}$	[152]	3
Verma <i>et al.</i>	$X_r = a e^{(-k t)} + (1 - a) e^{(-g t)}$	[153]	3
Midilli <i>et al.</i>	$X_r = e^{-k (t)^n} + b t$	[146]	4

Les modèles sont dans un premier temps appliqués aux données de cinétiques de séchage à l'étuve aux différentes températures fixes afin de déterminer le meilleur modèle. Ainsi, l'évolution des paramètres de ce meilleur modèle en fonction de la température permet de valider ce dernier sur les données de cinétiques en serre solaire à des températures variables au cours du séchage.

II.6.2.3 COURBES CARACTÉRISTIQUES DE SÉCHAGE

Cette méthodologie des Courbes Caractéristiques de Séchage (CCS) établie par VAN MEEL consiste à représenter la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau à différentes températures et à déterminer la fonction de la courbe passant par le maximum de points. Elle (CCS) permet d'étudier le comportement du produit dans sa globalité sans tenir compte des phénomènes complexes de transfert internes [66], [68], [71], [154]. Les vitesses de séchage en fonction de la teneur en eau réduite prédite sont tracées sur le même graphe pour toutes les températures.

$$\frac{dX_r \text{pred}}{dt} = f(X_r \text{pred})$$

Équation 34

La CCS est obtenue en déterminant la courbe passant par le maximum de points. Elle reflète ainsi le comportement du produit indépendamment des conditions des expériences et représente la

carte d'identité du produit. L'équation de la CCS est établie par régression en utilisant l'outil de calcul scientifique Scilab.

II.6.3 RÉSULTATS

Les coefficients de Lin obtenus pour le test de concordance des mesures pour toutes les températures confondues varient entre 0,99936 et 0,99993 avec un intervalle de confiance de [0,9991869 ; 0,9999431]. Ceci indique qu'il existe une parfaite concordance entre les trois mesures effectuées pour chaque variété aussi bien pour le séchage à l'étuve qu'en serre solaire.

II.6.3.1 ÉVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU RÉDUITE DES QUATRE VARIÉTÉS D'OIGNON SÉCHÉS À L'ÉTUVE ET EN SERRE SOLAIRE

Les **Figure 32** et **Figure 33** présentent respectivement, en fonction du temps de séchage, l'évolution de la teneur en eau des variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 séchés à l'étuve et en serre solaire. La détermination des teneurs en eau est faite à partir des **Équation 23** et **Équation 24**.

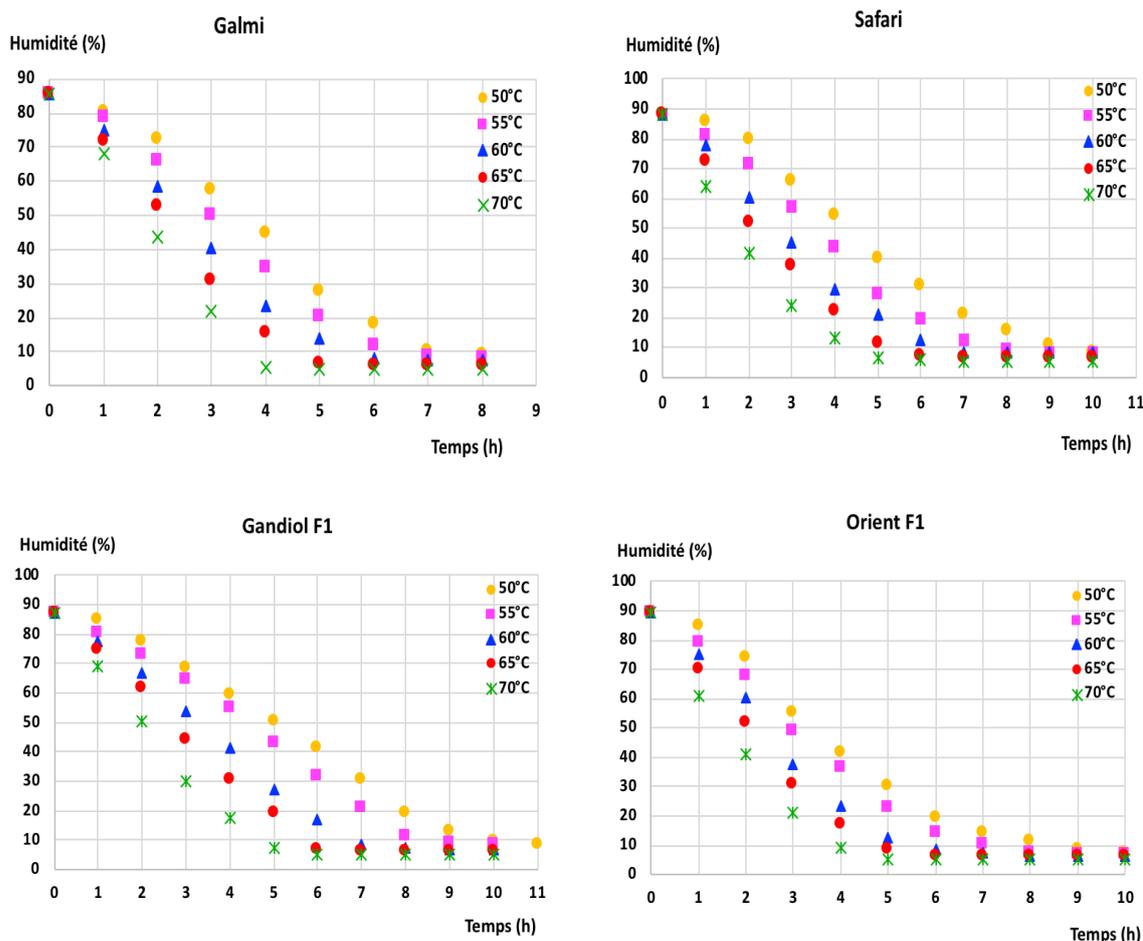


Figure 32 : Évolution de la teneur en eau des variétés d'oignon séchées à l'étuve.

La vitesse d'élimination de l'eau des quatre variétés d'oignon augmente avec la température de séchage (température contrôlée au sein de l'étuve). Avec les températures de séchage de 50 °C, 55 °C, 60 °C, 65 °C et 70 °C, l'humidité de stabilité ($\leq 8\%$) est atteinte respectivement pour la variété :

- ❖ Violet de Galmi au bout de 8h, 7h, 6h, 5h et 4h ;
- ❖ Safari au bout de 10h, 9h, 7h, 6h et 5h ;
- ❖ Gandiol F1 au bout de 11h, 9h, 7h, 6h et 5h ;
- ❖ Orient F1 au bout de 9h, 8h, 7h, 5h et 5h.

Il apparaît que le temps de séchage des quatre variétés d'oignon diminue avec l'augmentation de la température. Par ailleurs, les meilleurs couples temps-température de séchage se situent entre 55 °C - 65 °C / 7h - 8h avec un optimum à 60 °C/ 6h (Violet de Galmi) et 7h (Safari, Gandiol F1 et Orient F1).

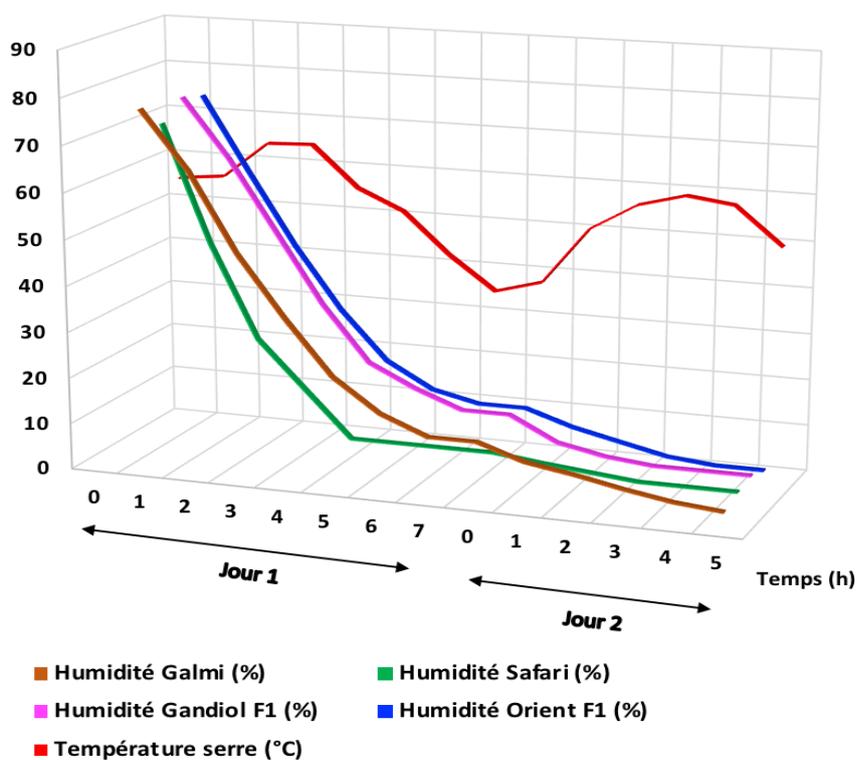


Figure 33 : Évolution de la teneur en eau des variétés d'oignon séchés en serre solaire.

Dans les conditions de séchage en serre solaire, l'humidité de stabilité des variétés séchées est atteinte au bout de 8h pour les variétés Safari et Gandiol F1 et de 9h pour les variétés Violet de Galmi et Orient F1. En début de séchage lors de la première journée, la température dans la serre augmente et se stabilise à un maximum d'environ 65 °C au bout de 2h de temps. Puis la température décroît jusqu'à 35 °C à la fin du premier jour de séchage. L'arrêt du séchage pour le jour 1 s'est fait au bout de 7h car l'élimination de l'eau devient faible et les basses températures peuvent altérer la qualité des produits séchés. Selon les variétés, la teneur en eau des oignons se

situent entre 8 et 10 % au bout de 7h de séchage en jour 1. En début de la seconde journée, le séchage reprend avec ces mêmes teneurs en eau à t_0 (aucune variation de la teneur en eau des oignons séchés n'est observée au cours de la nuit du fait de la conservation dans un dessicateur). Au second jour de séchage, les humidités de stabilité sont atteintes au bout d'1h à 2h selon les variétés. Les résultats du test statistique pour la comparaison des données de la cinétique de séchage (étuve *versus* serre solaire) sont compris entre [-0,44906 - 0,73362] pour le paramètre de Student (t), [0,4697 - 0,9572] pour les valeurs de p et [24 - 26] pour le degré de liberté (df). Quelle que soit la température de séchage à l'étuve, les valeurs de $p > 5\%$ montrent qu'il n'existe pas de différence significative entre les cinétiques de séchage à l'étuve et celles en serre solaire [155].

II.6.3.2 MODÉLISATION DE LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE A L'ÉTUVE

II.6.3.2.1 DETERMINATION DU MEILLEUR MODELE

II.6.3.2.1.1 CLASSEMENT DES PARAMETRES STATISTIQUES DES DIFFERENTS MODELES

Les critères statistiques, obtenus par la méthode des moindres carrés pour la détermination du meilleur modèle, sont exposés dans les Tableau XXIII, Tableau XXIV, Tableau XXV et Tableau XXVI respectivement pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1. Ces critères sont le coefficient de détermination (R^2) et le chi deux (χ^2) pour apprécier respectivement la dispersion et l'adéquation entre les données expérimentales et celles prédites par le modèle.

Tableau XXIII : Critères statistiques de choix du meilleur modèle pour la variété Violet de Galmi.

Violet de Galmi	Température (°C)									
	50		55		60		65		70	
Modèles	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2
A. D.	0,5805	0,0173	0,6254	0,0143	0,6774	0,0117	0,6840	0,0140	0,6955	0,0173
TT. E	0,5805	0,0151	0,6254	0,0123	0,6774	0,0098	0,6840	0,0112	0,6955	0,0130
Lewis	0,5805	0,0135	0,6254	0,0108	0,6774	0,0084	0,6840	0,0093	0,6955	0,0104
Two-term	0,6354	0,0234	0,6740	0,0197	0,7178	0,0163	0,7193	0,0201	0,7263	0,0272
H. P.	0,6354	0,0176	0,6740	0,0140	0,7178	0,0109	0,7193	0,0121	0,7263	0,0136
Logarithmique	0,8217	0,0089	0,8471	0,0072	0,8772	0,0056	0,8908	0,0060	0,9080	0,0066
Midilli <i>et al.</i>	0,9493	0,0285	0,8908	0,0093	0,8825	0,0091	0,8135	0,0083	0,8382	0,0108
Page	0,9840	0,0009	0,9872	0,0006	0,9871	0,0004	0,9835	0,0004	0,9890	0,0006
Verma <i>et al.</i>	0,9848	0,0012	0,9925	0,0007	0,9965	0,0005	0,9829	0,0009	0,9672	0,0018

Légende : Approximation of diffusion (A. D.), Two-Term Exponential (TT. E.), Henderson & Pabis (H. P.).

Les valeurs de R^2 et χ^2 (**Tableau XXIII**) montrent que le modèle Verma *et al.* est le meilleur modèle dans la plage de température allant de 50 °C à 60 °C, alors que pour les températures 65 °C et 70 °C, Page est le meilleur modèle pour la variété Violet de Galmi. Selon la température de séchage, les valeurs de R^2 et de χ^2 sont comprises respectivement entre 0,9835 et 0,9890 et 0,0004 et 0,0009 pour le modèle Page ; entre 0,9672 et 0,9965 et 0,0005 et 0,0018 pour le modèle Verma *et al.* Les R^2 moyens et χ^2 moyens, toutes températures confondues, sont respectivement de 0,9862 et 0,0006 avec le modèle Page et 0,9848 et 0,0010 avec le modèle Verma *et al.* Ainsi, le modèle Page est le meilleur modèle pour la variété Violet de Galmi avec un coefficient de détermination légèrement plus proche de 1 que celui de Verma *et al.*

Tableau XXIV : Critères statistiques de choix du meilleur modèle pour la variété Safari.

Safari	Température (°C)									
	50		55		60		65		70	
Modèles	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2
A. D.	0,5814	0,0142	0,6534	0,0107	0,7448	0,0059	0,8073	0,0042	0,9081	0,0017
TT. E	0,5814	0,0126	0,6534	0,0094	0,7448	0,0050	0,8073	0,0036	0,9081	0,0015
Lewis	0,5814	0,0113	0,6534	0,0083	0,7448	0,0044	0,8073	0,0031	0,9081	0,0013
Two-term	0,6451	0,0196	0,6996	0,0145	0,7780	0,0080	0,8257	0,0055	0,9142	0,0022
H. P.	0,6451	0,0153	0,6996	0,0108	0,7780	0,0057	0,8257	0,0039	0,9142	0,0015
Logarithmique	0,8448	0,0057	0,8730	0,0047	0,9010	0,0030	0,9112	0,0029	0,9389	0,0016
Midilli <i>et al.</i>	0,8450	0,0416	0,8749	0,0175	0,9843	0,0181	0,8672	0,0072	0,8761	0,0050
Page	0,9935	0,0003	0,9824	0,0004	0,9952	0,0003	0,9843	0,0006	0,9743	0,0005
Verma <i>et al.</i>	0,9884	0,0003	0,9928	0,0007	0,9949	0,0002	0,9887	0,0006	0,9780	0,0005

Légende : Approximation of diffusion (A. D.), Two-Term Exponential (TT. E.), Henderson & Pabis (H. P.)

Pour la variété Safari (**Tableau XXIV**), il apparaît qu'en fonction de la température de séchage, le meilleur modèle est soit celui de Page (R^2 entre 0,9743 et 0,9952 ; χ^2 entre 0,0003 et 0,0006) soit Verma *et al.* (R^2 entre 0,9780 et 0,9949 ; χ^2 0,0002 et 0,0007). La tendance de l'évolution du coefficient de détermination R^2 en fonction de la température de séchage est irrégulière avec le modèle Page, tandis qu'avec le modèle Verma *et al.*, la tendance est à la hausse à chaque pas de 5 °C dans la plage de température 50 °C à 60 °C et baisse à partir de 65 °C. Par ailleurs, les R^2 moyens et χ^2 moyens, toutes températures confondues, sont respectivement de 0,9885 et 0,0004 avec le modèle Page et 0,9961 et 0,0005 avec le modèle Verma *et al.* Le modèle empirique Verma *et al.*, avec le coefficient de détermination le plus proche de 1, est le meilleur modèle toutes températures confondues pour la variété Safari.

Tableau XXV : Critères statistiques de choix du meilleur modèle pour la variété Gandiol F1.

Gandiol F1	Température (°C)									
	50		55		60		65		70	
Modèles	R ²	χ ²	R ²	χ ²	R ²	χ ²	R ²	χ ²	R ²	χ ²
A. D.	0,5977	0,0125	0,6280	0,0118	0,6785	0,0095	0,7098	0,0089	0,8070	0,0047
TT. E	0,5977	0,0114	0,6280	0,0106	0,6785	0,0083	0,7098	0,0076	0,8070	0,0040
Lewis	0,5977	0,0105	0,6280	0,0097	0,6785	0,0074	0,7098	0,0067	0,8070	0,0035
Two-term	0,6468	0,0165	0,6741	0,0153	0,7167	0,0125	0,7400	0,0117	0,8207	0,0060
H. P.	0,6468	0,0138	0,6741	0,0123	0,7167	0,0094	0,7400	0,0084	0,8207	0,0043
Logarithmique	0,7428	0,0367	0,7772	0,0160	0,9764	0,0109	0,9640	0,0109	0,8874	0,0071
Midilli <i>et al.</i>	0,8246	0,0066	0,8741	0,0048	0,8946	0,0037	0,9042	0,0037	0,9058	0,0034
Page	0,9832	0,0008	0,9665	0,0008	0,9796	0,0005	0,9835	0,0007	0,9731	0,0006
Verma <i>et al.</i>	0,9846	0,0012	0,9750	0,0018	0,9836	0,0010	0,9812	0,0012	0,9834	0,0006

Légende : Approximation of diffusion (A. D.), Two-Term Exponential (TT. E.), Henderson & Pabis (H. P.)

Parmi les neuf modèles testés pour la modélisation de la cinétique de la variété Gandiol F1 (**Tableau XXV**), le meilleur modèle est soit celui de Page, soit celui de Verma *et al.* selon la température de séchage. L'évolution du coefficient de détermination en fonction de la température de séchage est irrégulière pour ces deux modèles avec des valeurs comprises entre 0,9665 et 0,9835 pour Page et 0,9750 et 0,9846 pour Verma *et al.*, tandis que les valeurs de χ^2 sont relativement stables 0,0005 et 0,0008 pour le modèle Page et 0,0006 et 0,0018 pour le modèle Verma *et al.* Le R² et le χ^2 moyens, toutes températures confondues pour la variété Gandiol F1, sont respectivement de 0,9772 et 0,0007 pour le modèle Page et de 0,9882 et 0,0012 pour Verma *et al.* Avec un coefficient de détermination supérieur à celui du modèle Page, le modèle empirique Verma *et al.* est le meilleur modèle pour la variété Gandiol F1.

Tableau XXVI : Critères statistiques de choix du meilleur modèle pour la variété Orient F1.

Orient F1	Température (°C)									
	50		55		60		65		70	
Modèles	R ²	χ ²	R ²	χ ²	R ²	χ ²	R ²	χ ²	R ²	χ ²
A. D.	0,6786	0,0086	0,7110	0,0076	0,7550	0,0068	0,8024	0,0050	0,9016	0,0022
TT. E	0,6786	0,0077	0,7110	0,0066	0,7550	0,0059	0,8024	0,0042	0,9016	0,0019
Lewis	0,6786	0,0070	0,7110	0,0059	0,7550	0,0051	0,8024	0,0036	0,9016	0,0016
Two-term	0,7121	0,0114	0,7437	0,0101	0,7788	0,0090	0,8209	0,0067	0,9081	0,0029
H. P.	0,7121	0,0091	0,7437	0,0075	0,7788	0,0064	0,8209	0,0044	0,9081	0,0019
Logarithmique	0,7859	0,0114	0,9705	0,0176	0,8413	0,0097	0,8870	0,0063	0,9646	0,0021
Midilli et al.	0,8207	0,0065	0,8803	0,0041	0,8857	0,0046	0,9255	0,0029	0,9530	0,0019
Page	0,9941	0,0010	0,9834	0,0005	0,9740	0,0008	0,9818	0,0005	0,9795	0,0007
Verma et al.	0,9844	0,0004	0,9939	0,0005	0,9833	0,0008	0,9937	0,0006	0,9815	0,0008

Légende : Approximation of diffusion (A. D.), Two-Term Exponential (TT. E.), Henderson & Pabis (H. P.).

Tout comme les trois autres variétés, le meilleur modèle pour la variété Orient F1 est selon la température de séchage soit le modèle Page (R² entre 0,9740 et 0,9941 ; χ² entre 0,0005 et 0,0010) soit Verma *et al.* (R² entre 0,9815 et 0,9939 ; χ² 0,0004 et 0,0008). La tendance de l'évolution du coefficient de détermination est irrégulière aussi bien avec le modèle Page que le modèle Verma *et al.* (**Tableau XXVI**). Le R² moyen et le χ² moyens, toutes températures confondues pour la variété Orient F1 sont respectivement de 0,9826 et 0,0007 avec le modèle Page et de 0,9873 et 0,0006 avec le modèle Verma *et al.* Le modèle empirique Verma *et al.* est alors le meilleur modèle toutes températures confondues pour la variété Orient F1. Le test statistique de Student indique l'absence de différence significative (p-value > 5 %) entre les valeurs de R² et de χ² obtenues avec les modèle Page et Verma *et al.* pour les quatre variétés.

II.6.3.2.1.2 ÉVOLUTION DE LA TENEUR EN EAU RÉDUITE EXPÉRIMENTALE ET PRÉDITE PAR LE MODÈLE VERMA ET AL. POUR LE SÉCHAGE À L'ÉTUVE

Les **Figure 34** et **Figure 35** présentent, respectivement pour les variétés Violet de Galmi et Safari ainsi que Gandiol F1 et Orient F1, l'évolution, en fonction du temps de séchage, des valeurs expérimentales de la teneur en eau réduite et des valeurs prédites avec le meilleur modèle empirique mathématique Verma *et al.* L'équation du meilleur modèle est :

$$X_{rpred,t} = a e^{-kt} + (1 - a)e^{-gt} \quad \text{Équation 35}$$

Avec a, k et g les paramètres du modèle déterminés par régression multiple à chaque température.

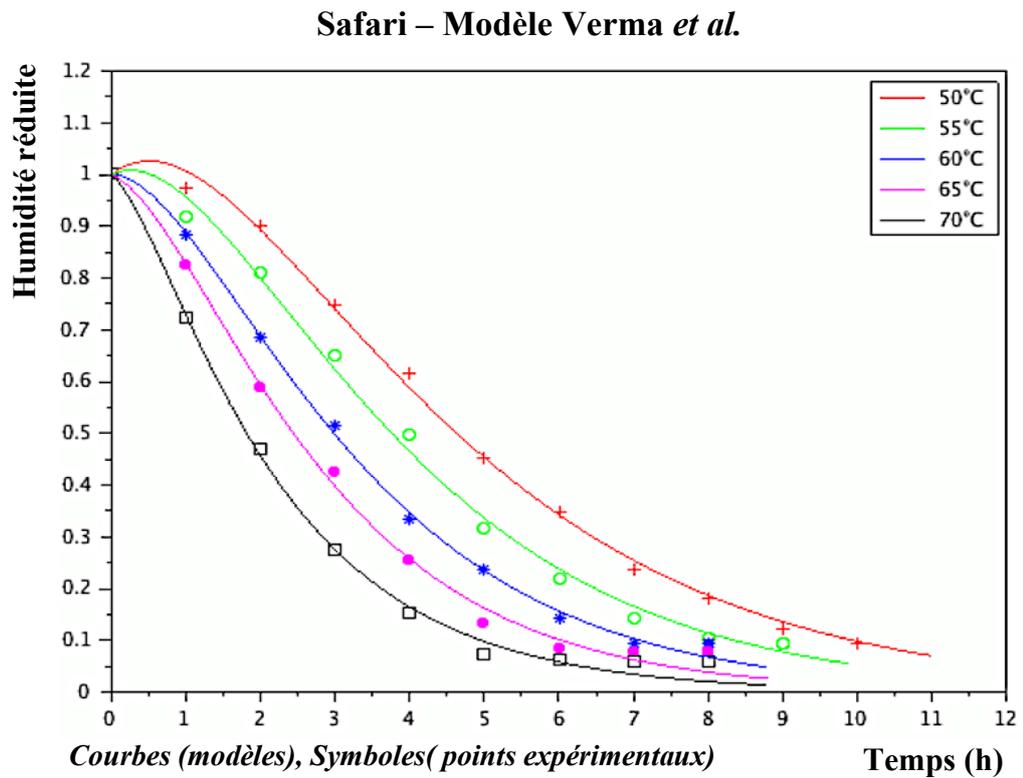
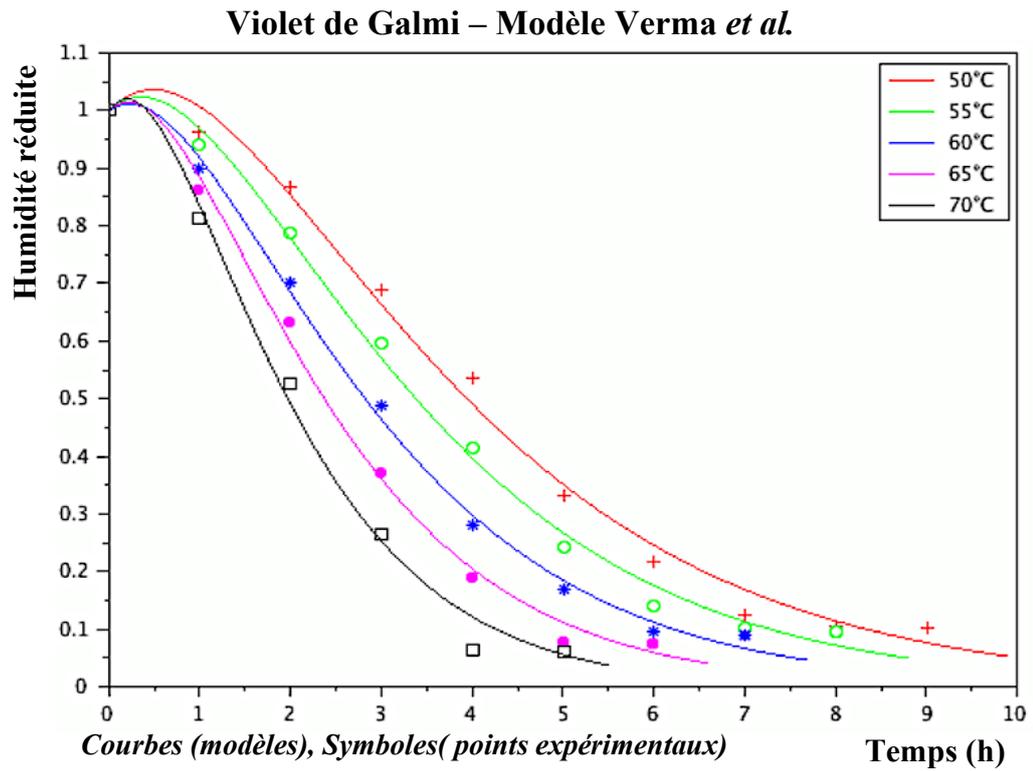
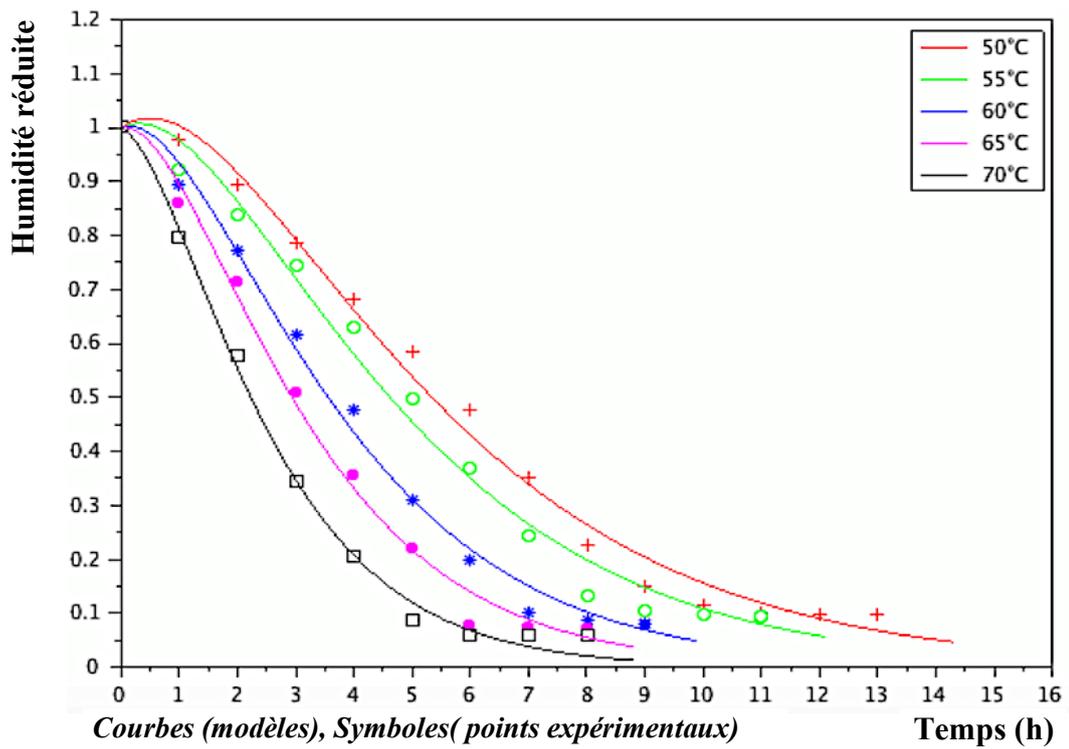


Figure 34 : Évolution de la teneur en eau réduite (prédite par le meilleur modèle et expérimentale) en fonction du temps de séchage des variétés Violet de Galmi et Safari.

Gandiol F1 – Modèle Verma *et al.*



Orient F1 – Modèle Verma *et al.*

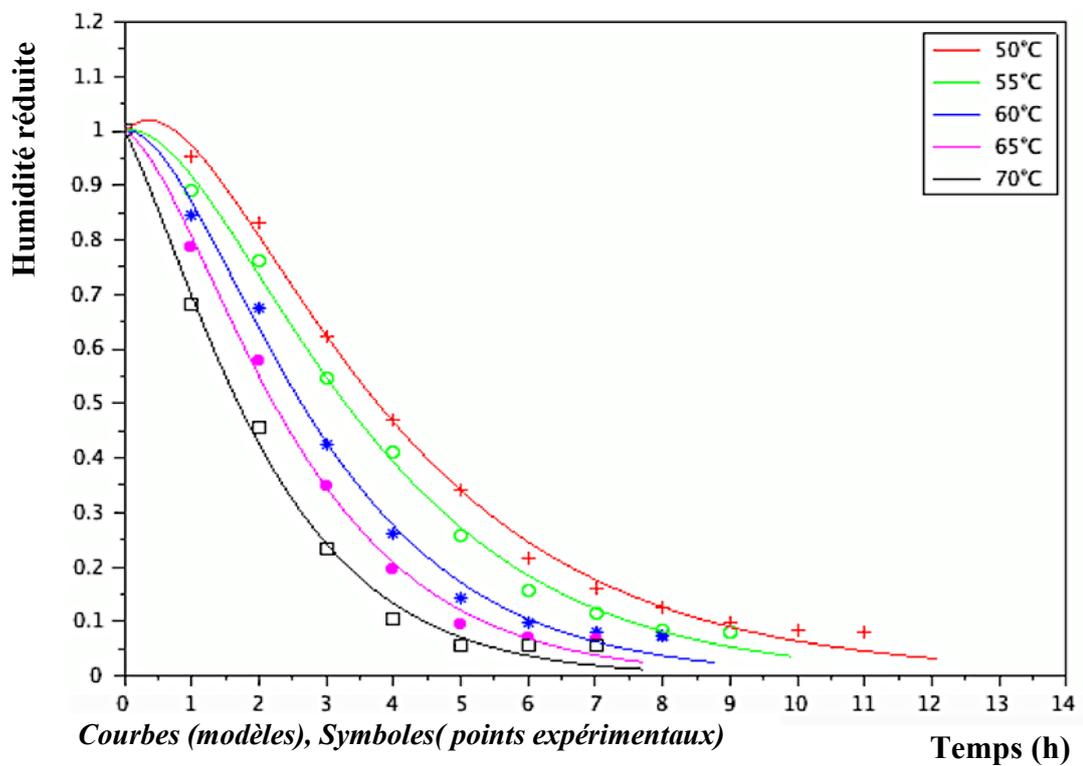


Figure 35 : Évolution de la teneur en eau réduite (prédite par le meilleur modèle et expérimentale) en fonction du temps de séchage des variétés Gandiol F1 et Orient F1.

Quelle que soit la température de séchage des variétés Violet de Galmi et Safari (**Figure 34**), Gandiol F1 et Orient F1 (**Figure 35**) à l'étuve, ces courbes indiquent une adéquation quasi parfaite entre les teneurs en eau réduite expérimentales et celles prédites par le modèle Verma *et al.* Les températures pour lesquelles la dispersion (R^2 est le premier critère de classement) et l'adéquation (χ^2 est le second critère) sont meilleures :

- ❖ la plage de 50 °C -60 °C pour la variété Violet de Galmi, avec à chaque augmentation de la température d'un pas de 5 °C, des valeurs de R^2 situées entre 0,9848 à 0,9965 et des valeurs de χ^2 entre 0,0005 et 0,0012. A partir de 65 °C, la dispersion (R^2 entre 0,9672 et 0,9829) et l'adéquation (χ^2 entre 0,0009 et 0,0018) se détériorent ;
- ❖ la plage de 50 °C à 65 °C pour la variété Safari, avec à chaque augmentation de la température d'un pas de 5 °C, des valeurs de R^2 situées entre 0,9884 à 0,9949 et des valeurs de χ^2 entre 0,0002 et 0,0007. A 70 °C, la dispersion commence à s'altérer (R^2 égale à 0,9780) ;
- ❖ la plage de 50 °C à 70 °C pour la variété Gandiol F1, avec des valeurs de R^2 et χ^2 respectivement entre 0,9812 et 0,9846 et 0,0006 et 0,0012 excepté à 55 °C (R^2 de 0,9750 et χ^2 de 0,0018) ;
- ❖ la plage de 50 °C à 70 °C pour la variété Orient F1, avec des valeurs de R^2 et χ^2 respectivement entre 0,9815 et 0,9939 et 0,0004 et 0,0008

La comparaison inter-variétés selon le R^2 moyen et le χ^2 moyen toutes températures confondues, indique le classement suivant dans l'ordre de moindre dispersion : Safari, Gandiol F1, Orient F1 et Violet de Galmi ; et dans l'ordre de meilleure adéquation : Safari, Orient F1, Violet de Galmi et Gandiol F1.

II.6.3.3 DÉTERMINATION DES COURBES CARACTÉRISTIQUES DE SÉCHAGE

Sur les **Figure 36** et **Figure 37**, sont exposées les Courbes Caractéristiques de Séchage (CCS) des variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 dans le domaine de teneur en eau réduite entre 0 et 1.

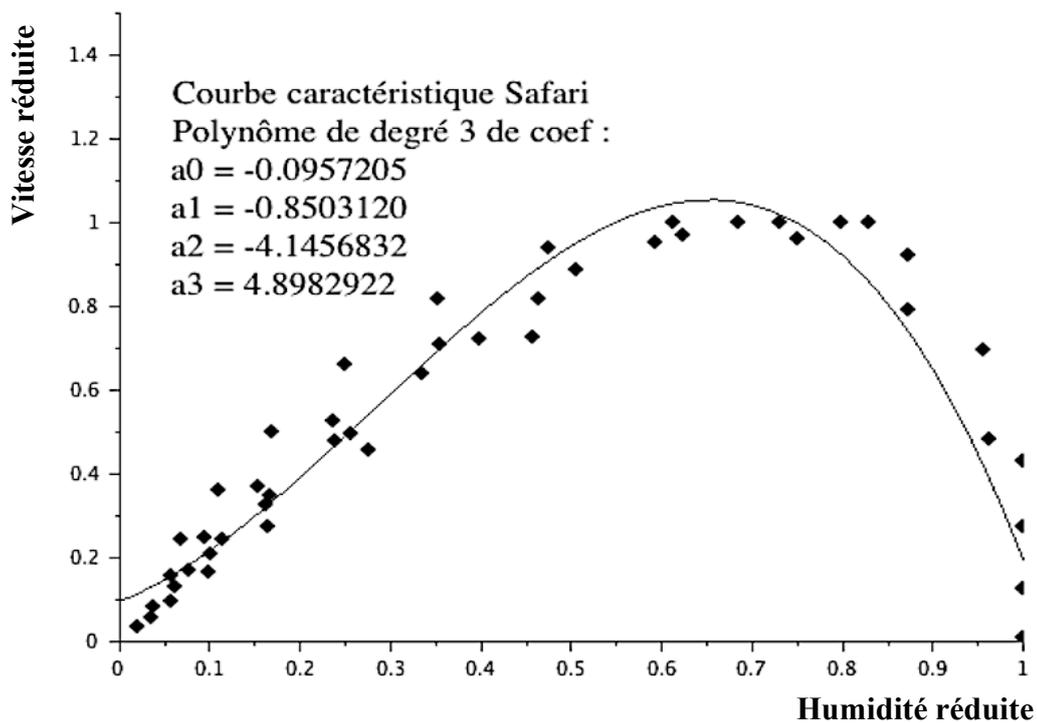
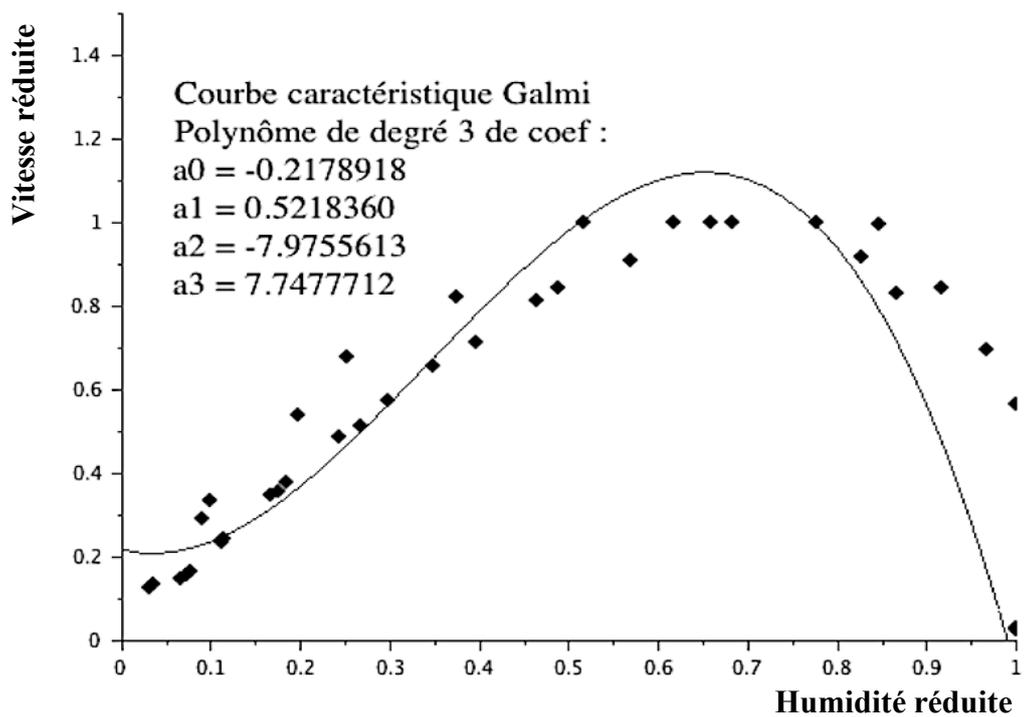


Figure 36 : Courbes caractéristiques de séchage des variétés d'oignon Violet de Galmi et Safari.

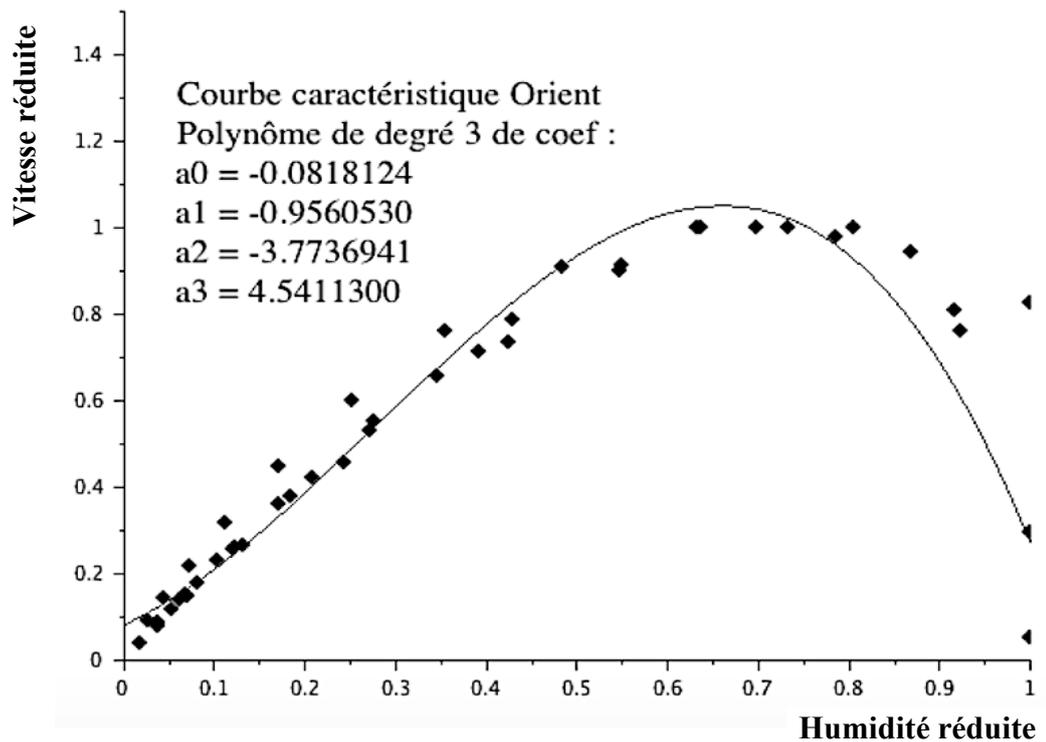
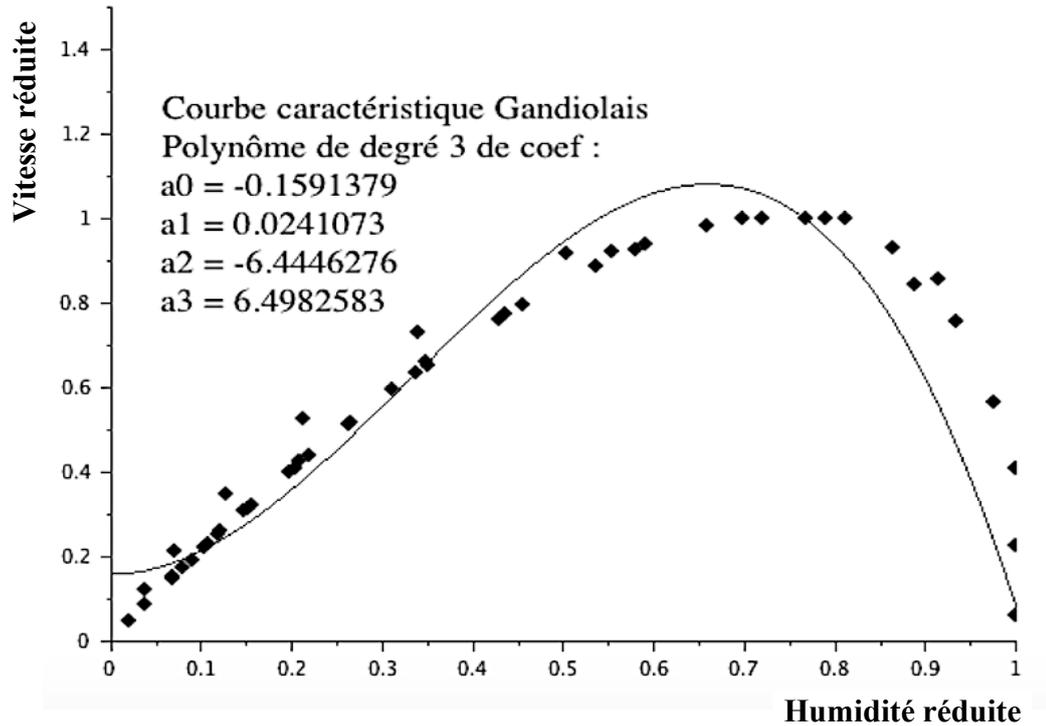


Figure 37 : Courbes caractéristiques de séchage des variétés d'oignon Gandiol F1 et Orient F1.

Ces courbes décrivant le comportement des variétés d'oignon Violet de Galmi et Safari (**Figure 36**), et celui des variétés Gandiol F1 et Orient F1 (**Figure 37**), à l'échelle macroscopique, montrent que la vitesse de séchage augmente au début du séchage et présentent un pseudo-plateau (vitesse constante) pour des valeurs de teneur en eau réduite entre 0,6 et 0,7. A partir de 0,6, plus la teneur

en eau réduite diminue plus la vitesse de séchage baisse. Pour les CCS des quatre variétés, les modèles (**Tableau XXVII**) établis par régression multiple sont des polynômes de degré 3 [52], [66], [68], [71].

Tableau XXVII : Équations des courbes caractéristiques de séchage des variétés Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.

Variété	Équation
Violet de Galmi	$dX_r/dt = 7,75 Xr^3 - 7,98 Xr^2 + 0,52 Xr - 0,220$
Safari	$dX_r/dt = 4,90 Xr^3 - 4,15 Xr^2 - 0,85 Xr - 0,096$
Gandiol F1	$dX_r/dt = 6,50 Xr^3 - 6,44Xr^2 + 0,024 Xr - 0,16$
Orient F1	$dX_r/dt = 4,54 Xr^3 - 3,77 Xr^2 - 0,96 Xr - 0,082$

Les constantes du polynôme de la variété Violet de Galmi sont plus élevées, suivies de celles de Gandiol F1, Safari et enfin Orient F1. Les valeurs de R^2 des modèles polynomiaux établis pour les CCS des quatre variétés sont meilleures dans le domaine de teneur en réduite entre 0,1 et 0,7 qu'entre 0 et 1. Ces valeurs sont respectivement de 0,932 à 0,987 et 0,719 à 0,819 selon les variétés. Ainsi, Le modèle polynomial décrit mieux les CCS pour des teneurs en eau réduite de 0,1 à 0,7. Un modèle plus général est à développer dans le domaine de 0 à 1.

La meilleure adéquation entre le modèle et les données expérimentales des CCS est observée dans l'ordre avec Gandiolais, Orient, Safari et Violet de Galmi. Le classement des variétés par ordre de vitesse de séchage la plus lente est, Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.

II.6.3.4 MODÉLISATION DE LA CINÉTIQUE DE SÉCHAGE EN SERRE SOLAIRE

Le test statistique de Student entre les résultats de teneur en eau des produits séchés à l'étuve (toutes températures confondues) et ceux séchés en serre solaire révèle l'absence de différence significative car toutes les valeurs de p supérieures à 5 % [155]. Cette absence de différence significative permet d'émettre l'hypothèse que la cinétique de séchage en serre solaire suit le même modèle que celle à l'étuve notamment le modèle Verma *et al.* Cependant, la température dans la serre n'étant pas stable au cours du séchage, les cinétiques de séchage, modélisées pour différentes températures fixes à l'étuve, ont permis de déterminer la dépendance à la température des paramètres du meilleur modèle et de développer un modèle intégrant les variables temps et température pour le séchage en serre solaire.

L'équation du meilleur modèle est :

$$X_{rpred,T,t} = a e^{-kt} + (1 - a)e^{-gt} \quad \text{Équation 36}$$

Avec a, k et g les paramètres du modèle dont l'évolution est présentée sur la **Figure 38**.

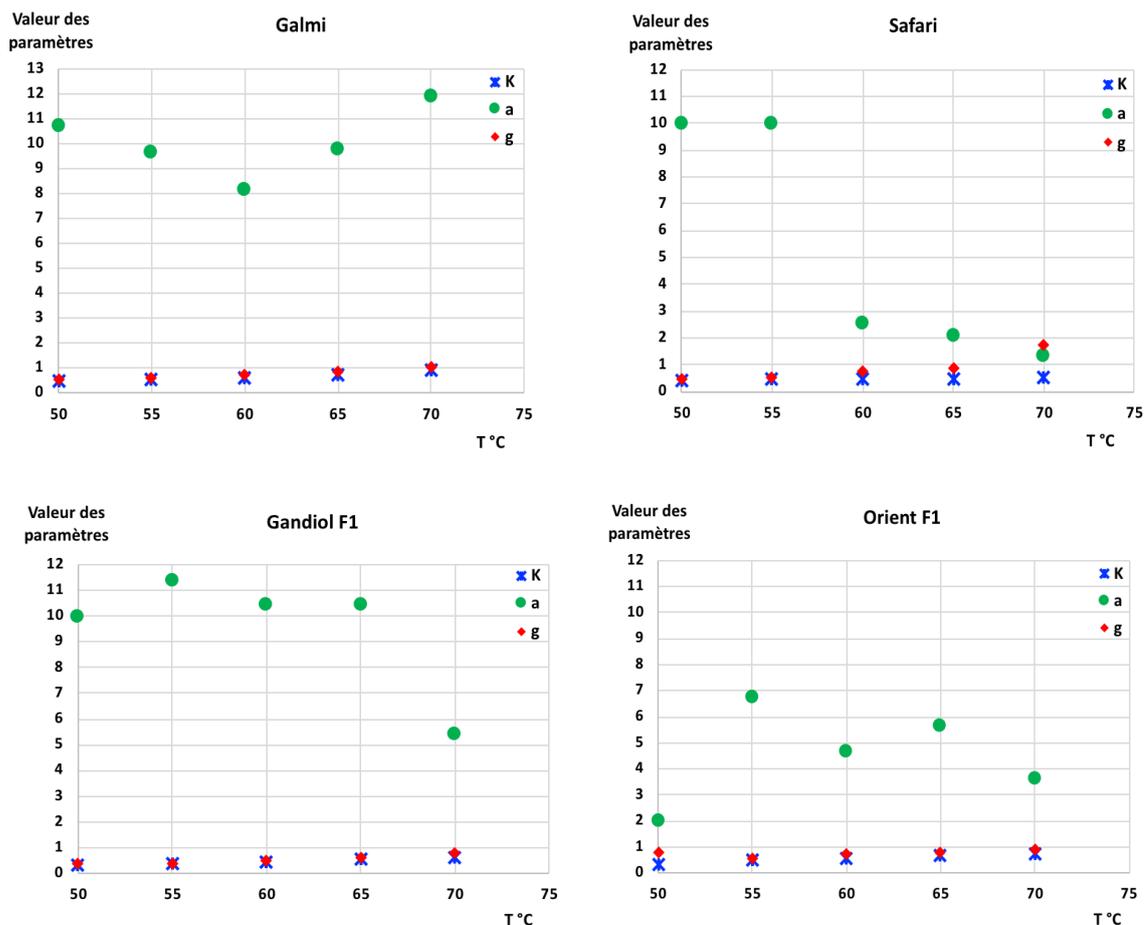


Figure 38 : Évolution en fonction de la température des paramètres du meilleur modèle Verma *et al.* pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiolais et Orient F1.

Les paramètres k et g, constantes cinétiques du séchage (s^{-1}), augmentent globalement avec la température de séchage pour les quatre variétés, excepté les valeurs de k de la variété Safari pour le pallier de température de 55 °C à 60 °C et g de la variété Orient pour le pallier de température de 50 °C à 55 °C. Quant au paramètre a, constante du modèle sans dimension, sa tendance d'évolution en fonction de la température est irrégulière.

Les courbes de tendance des paramètres du meilleur modèle Verma *et al.* en fonction de la température, déterminées par régression non linéaire, sont des polynômes de degré 2 (**Tableau XXVIII**).

Tableau XXVIII : Equation des paramètres du meilleur modèle Verma *et al.* en fonction de la température.

Variété	Équation paramètre	Coefficient corrélation
	$a =$	R^2
Violet de Galmi	$2.70010^{-2}T^2 - 3.190 T + 102.883$	0,915
Safari	$1.53310^{-2}T^2 - 2.344 T + 89.873$	0,847
Gandiol F1	$- 3.43210^{-2}T^2 + 3.919 T - 100.312$	0,912
Orient F1	$- 3.01210^{-2}T^2 + 3.659 T - 105.020$	0,625
	$k =$	
Violet de Galmi	$8.335 10^{-4}T^2 - 0.078 T + 2.294$	0,999
Safari	$- 6.760 10^{-5}T^2 + 0.014 T - 0.143$	0,912
Gandiol F1	$3.23510^{-4}T^2 - 0.022 T + 0.627$	0,997
Orient F1	$- 4.76310^{-4}T^2 + 0.075 T - 2.237$	0,998
	$g =$	
Violet de Galmi	$7.201 10^{-4}T^2 - 0.062 T + 1.857$	0,999
Safari	$4.31110^{-3}T^2 - 0.457 T + 12.605$	0,962
Gandiol F1	$7.65910^{-4}T^2 - 0.071 T + 2.023$	0,996
Orient F1	$1.71510^{-3}T^2 - 0.198 T + 6.416$	0,680

Les équations des courbes de tendance des paramètres du modèle Verma *et al.* indique qu'une bonne corrélation est observée avec des valeurs de R^2 proches de 1 (R^2 entre 0,915 et 0,999) exception faite pour le paramètre a des variétés orient F1 et Safari et le paramètre g de la variété Orient F1.

La **Figure 39** présente l'évolution de la teneur en eau expérimentale et celle prédite par le modèle Verma *et al.* température-dépendante.

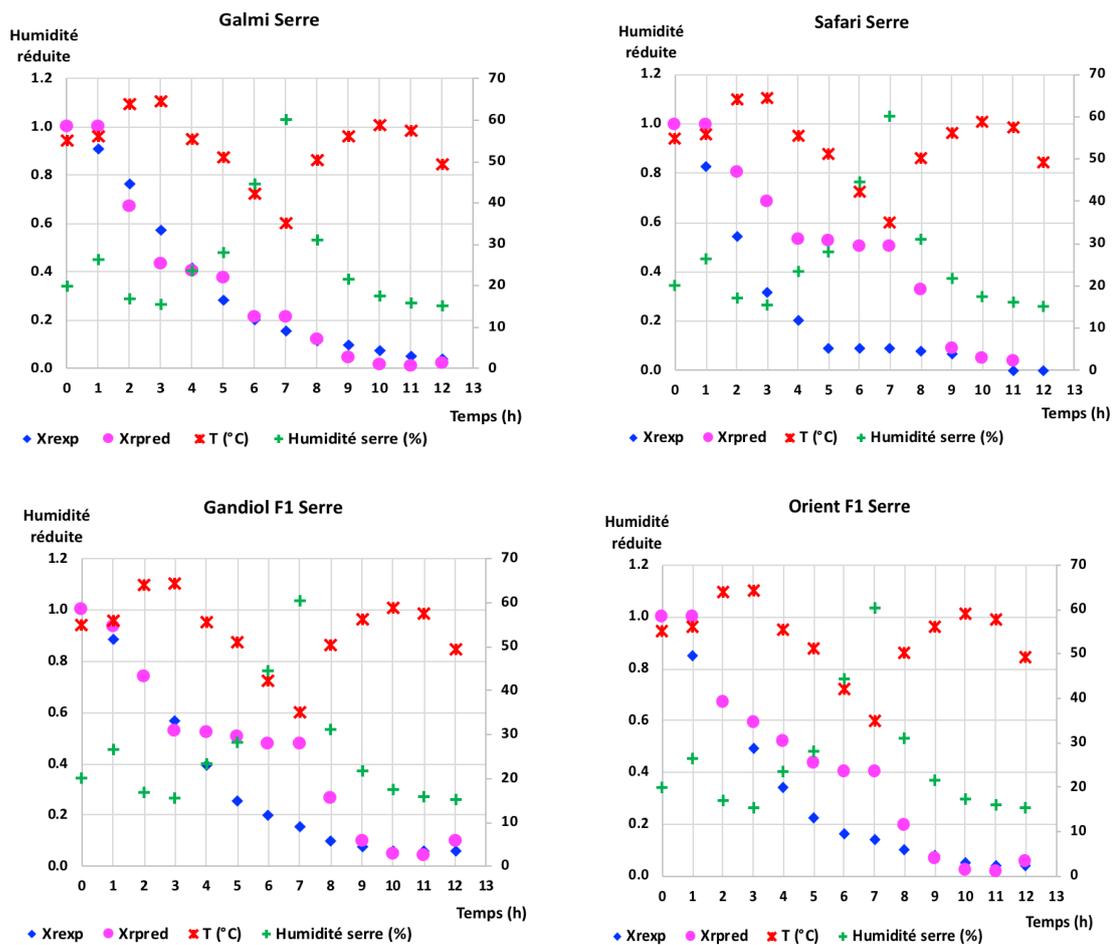


Figure 39 : Évolution au cours du séchage en serre solaire de la teneur en eau réduite expérimentale et prédite par le modèle Verma *et al.* température dépendante.

Globalement, il apparaît que le modèle Verma *et al.* température-dépendante ne décrit pas parfaitement la cinétique de séchage en serre solaire. En effet excepté pour la variété Violet de Galmi dont les courbes expérimentale et prédite semblent identiques, la dissemblance pour les trois autres variétés est très marquée entre 3h et 9h de séchage.

II.6.4 DISCUSSION

Les deux meilleurs modèles, qui décrivent les cinétiques de séchage des variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1, sont Page et Verma *et al.* quelle que soit la température. Sur la plage de température allant de 50 °C à 70 °C, Les valeurs de R^2 moyen et de χ^2 moyen (tableaux 1,2, 3 et 4) déterminées par la méthode des moindres carrés permettent de classer le modèle Verma *et al.* (R^2 0,9873 à 0,9961 et χ^2 0,0005 à 0,0012) devant le modèle Page (R^2 0,9772 à 0,9885 et χ^2 0,0004 à 0,0007) pour les variétés Safari, Gandiol F1 et Orient F1 tandis que le classement inverse est observé pour la variété Violet de Galmi (R^2 et χ^2 moyens respectivement de 0,9862 et 0,0006 avec Page et de 0,9848 et 0,0010 avec Verma *et al.*).

En se limitant à la plage de température de 50 °C à 65 °C, meilleures conditions de séchage des quatre variétés d'oignon [155], la comparaison des valeurs de R^2 moyen et de χ^2 moyen obtenues avec ces deux meilleurs modèles classent le modèle Verma *et al.* devant le modèle Page pour les quatre variétés. Par ailleurs, Le test statistique de Student indique l'absence de différence significative (p -value > 5 %) entre les valeurs de R^2 et de χ^2 obtenues avec les modèles Page et Verma *et al.* pour toutes les variétés.

Ainsi, quelle que soit la température de séchage à l'étuve, le modèle Verma *et al.* est le meilleur modèle retenu pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 avec des valeurs de R^2 moyen et de χ^2 moyen respectivement de 0,9848 à 0,9961 et 0,0005 et 0,0012. Le classement des variétés dans l'ordre de moindre dispersion est Safari, Gandiol F1, Orient F1 et Violet de Galmi ; tandis que dans l'ordre de meilleure adéquation, le classement indique Safari, Orient F1, Violet de Galmi et Gandiol F1.

Dans les conditions expérimentales de cette étude, le modèle Verma *et al.* établi pour le séchage des quatre variétés d'oignon, est un modèle exponentiel à deux termes. Ce dernier diffère du modèle établi par Sarsavadia en 2003 (modèle exponentiel à un terme) pour le séchage de l'oignon. Toutefois l'expression de ces deux modèles montre que la diffusion est l'un des phénomènes physiques pour la migration de l'eau lors du séchage de l'oignon [52], [91]. Cette différence s'explique par la complexité des phénomènes au cours du séchage dépendant des variétés d'oignon, des zones de culture, des conditions expérimentales et de la taille des échantillons.

Les courbes caractéristiques des quatre variétés d'oignon décrivent leur comportement à l'échelle macroscopique en faisant fi des phénomènes complexes à l'échelle microscopique et surtout des conditions expérimentales [154]. L'allure des CCS (figure 4) est identique à celle trouvée dans la littérature pour d'autres produits végétaux tels que oignon [91], [95] menthe [66], tomate [71], carotte [52]. Les forces capillaires impliquées majoritairement dans la migration de l'eau entraîne que la vitesse de séchage des quatre variétés décroît très rapidement dans la phase initiale (couche polymoléculaire d'eau), pour se stabiliser dans la phase finale vers une valeur de proche de l'humidité d'équilibre (X_r 0,1 à 0,2 selon les variétés). L'eau d'origine hygroscopique piégée à l'intérieur du produit diffuse lentement (monocouche d'eau). Par ailleurs les équations des CCS sont des polynômes de degré 3 [58].

Quant à la modélisation de la cinétique de séchage en serre solaire des variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1, le modèle Verma *et al.* intégrant l'évolution des paramètres du modèle en fonction de la température de la serre n'indique pas une excellente adéquation entre les valeurs expérimentales (**Figure 33**) et les valeurs prédites calculées à partir de l'**Équation 36** et les équation des paramètres (**Tableau XXVIII**).

Deux raisons majeures semblent expliquer ce décalage du modèle en serre solaire :

- ❖ d'une part, la sensibilité à la température des paramètres a , k et g déterminée par régression non linéaire montre une tendance régulière pour les constantes cinétiques de séchage k et g , alors que la tendance pour la constante du modèle « a » est irrégulière ;
- ❖ d'autre part, les paramètres du modèle dépendent des autres conditions expérimentales notamment l'humidité variable dans la serre [52], [123], [143], [156], [157].

En conclusion, le modèle mathématique empirique Verma *et al.*, modèle exponentiel à deux paramètres, est le meilleur modèle pour décrire la cinétique de séchage des quatre variétés aussi bien à l'étuve qu'en serre solaire dans les conditions expérimentales de cette étude.

Toutefois, le modèle incluant la variable température présente quelque lacune pour la modélisation de la cinétique de séchage en serre solaire car l'adéquation entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales est à améliorer (χ^2 pas très proche de 0). Ce modèle est à affiner en intégrant l'humidité à l'intérieur de la serre solaire dans l'évolution des paramètres du modèle.

Les courbes caractéristiques de séchage des variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 établies permettent de prédire l'évolution des cinétiques de séchage, d'optimiser et de maîtriser le processus de séchage malgré les phénomènes complexes. La variété Violet de Galmi, avec la vitesse de séchage la plus lente toutes températures confondues est la variété limitante pour le séchage simultané des quatre variétés.

II.7 DÉTERMINATION DES ISOTHERMES DE DÉSORPTION ET COMPARAISON ÉCONOMIQUE DES MODES DE SÉCHAGE À L'ÉTUVE ET EN SERRE SOLAIRE

La détermination de l'isotherme de sorption, traduisant la corrélation entre la teneur en eau et l'activité de l'eau, présente un intérêt tant sur le plan thermodynamique (une connaissance sur les enthalpies de sorption et des types de liaison de l'eau) que sur le plan technologique (un meilleur contrôle du séchage et la prévention contre certains effets délétères lors du stockage des produits après séchage tels que le collage et le prise en masse) afin de prédire les teneurs en eau d'équilibre des produits en fin de séchage et de maîtriser leur valorisation par déshydratation [134], [158].

De nombreux travaux antérieurs sur la modélisation des isothermes de sorption de divers produits alimentaires sont relevés dans les études existantes. Parmi ces travaux, peuvent être cités :

- ❖ Mazza et Lemaguer (1978) [159] ont établi à Alberta, les isothermes d'adsorption et de désorption de l'oignon jaune à 10, 30 et 45 °C. Le modèle validé est celui de Brunauer Emmet Teller (BET);
- ❖ Kiranoudis et al. (1993) [160] ont déterminé les isothermes de la patate, la carotte, le poivre, la tomate et l'oignon (85 % bh) dans la gamme d'activité de l'eau de 10 % à 90 % et température 30,45 et 60 °C et des valeurs de teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) comprise 10 et 30 % ms. Le modèle Guggenheim Anderson Boer (GAB) a été validé pour l'ensemble des échantillons ;
- ❖ Viswanathan et al. (2003) [161] ont déterminé, pour la tomate et l'oignon blanc, les isothermes à 30,40 et 50 °C et HR 15-85 %. Les modèles validés pour la tomate et l'oignon sont respectivement Henderson modifié et Hasley modifié;
- ❖ Adam et al. (2000) [162] ont montré que le modèle Oswin décrit mieux les isothermes de désorption pour les températures de 25 °C et de 30 à 70 °C par pas de 10 °C ;
- ❖ Alam et Islam (2015) [163] ont montré que le modèle GAB décrit mieux l'isotherme de désorption à 25 °C.

Dans les études publiées, les résultats de recherche sur la modélisation des isothermes de sorption de l'oignon aboutissent tous à des modèles différents selon les caractéristiques des produits. Le manque de données sur les variétés locales et l'importance des isothermes de désorption dans la maîtrise du processus de séchage et la conception des séchoirs justifient l'initiation de ces travaux de recherche.

L'objectif de ce travail consiste à déterminer à différentes températures les isothermes de désorption de quatre variétés d'oignon cultivées au Sénégal, à modéliser ces isothermes et déterminer certaines propriétés thermodynamiques à partir des modèles validés.

II.7.1 MATÉRIELS

II.7.1.1 MATÉRIEL VÉGÉTAL

Les variétés d'oignon sur lesquelles porte la détermination des isothermes sont le Violet de Galmi, le Safari, le Gandiol F1 et l'Orient F1. Elles proviennent de la coopérative de RAO située dans la région de Saint-Louis au Sénégal. Les oignons sont collectés directement bord champ et acheminés au laboratoire afin d'éviter toute source de mélange avec d'autres variétés.

Les teneurs en eau (% base humide) et activité de l'eau initiales des quatre variétés sont :

- ❖ Violet de Galmi $85,56 \pm 0,60 / 0,945 \pm 0,01$;
- ❖ Safari $88,11 \pm 0,61 / 0,950 \pm 0,001$
- ❖ Gandiolais $86,99 \pm 0,10 / 0,940 \pm 0,001$;
- ❖ Orient $89,13 \pm 0,69 / 0,947 \pm 0,009$.

II.7.1.2 MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL ET D'ANALYSE

Le matériel expérimental comprend :

- ❖ une étuve de marque MEMMERT avec une précision de $0,1^{\circ}\text{C}$;
- ❖ une balance de précision de marque Denver instrument (précision $0,0001\text{g}$) ;
- ❖ un awmètre de marque Rotronic HP23 ;
- ❖ des capsules en pyrex, des bocaux en verre avec couvercles hermétiques et la verrerie de laboratoire ;
- ❖ sels saturés

Les différents outils d'analyse statistiques et de modélisation sont :

- ❖ le logiciel R version 3.4.0 (Team R Core, 2017) pour le test de comparaison entre les deux méthodes de séchage, les analyses de variance et de concordances des mesures ;
- ❖ le logiciel Matlab version 6.0.0 pour la modélisation mathématique des isothermes de désorption et leurs résolutions, le calcul des R^2 et χ^2 ainsi que la détermination des chaleurs isotériques de désorption aux différentes températures. En effet, la méthode des moindres carrés a été programmée pour les différents modèles utilisés.

II.7.2 MÉTHODOLOGIE

II.7.2.1 DÉTERMINATION DES ISOTHERMES DE DÉSORPTION

La détermination des isothermes de désorption des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 est faite par la méthode gravimétrique statique dans une étuve avec régulation de la température et de l'humidité relative. Les expériences sont réalisées en triple sans ventilation sur la plage de température allant de 50°C à 65°C avec un pas de $+5^{\circ}\text{C}$. Les

échantillons sont prélevés sur trois bulbes d'oignon préparés selon le protocole décrit au niveau des sous – chapitres *II.2.1* et *II.2.2*.

Les coupelles, contenant 10 g d'oignon haché (épaisseur comprise entre 1,06 et 2,33 mm), sont placées au-dessus des sept solutions salines saturées dont les activités de l'eau à différentes températures sont connues (*Tableau XXIX*). Cette méthode statique gravimétrique, moins coûteuse, est la plus utilisée [116], [160], [164]. Les coupelles sont pesées trois fois par jour à intervalle de temps régulier jusqu'à l'atteinte de l'équilibre thermodynamique. Le poids constant à ce point correspondant à la masse humide (m_h) des échantillons.

Après mesure de l'activité de l'eau sur les échantillons séchés, la masse sèche ($m_{h,d}$) de ces derniers est déterminée par dessiccation à 105°C pendant 2h. La teneur en eau et l'activité de l'eau sont respectivement mesurées selon les méthodes de référence NF ISO 712 : 2009 et NF EN ISO 17025

La teneur en eau d'équilibre (X_{eq} en Kg H₂O Kg⁻¹ ms) est calculée selon la formule :

$$X_{eq} = \frac{m_h - m_{h,d}}{m_{h,d}} \quad \text{Équation 37}$$

Les isothermes de désorption (des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1) aux températures 50, 55, 60, et 65 °C sont obtenus par le tracé des courbes de teneur en eau d'équilibre (X_{eq} en kg H₂O par kg ms) en fonction de l'activité de l'eau.

Tableau XXIX : Activité de l'eau à différentes températures des sels utilisés pour la détermination des isothermes de désorption des quatre variétés d'oignon

Aw des sels utilisés à différentes Températures			
Nature du sel	50 °C	60 °C	70 °C
KOH	0,06	0,05	0,05
MgCl ₂	0,31	0,29	0,28
K ₂ CO ₃	0,41	0,39	0,37
NaNO ₃	0,69	0,67	0,65
NaCl	0,75	0,74	0,74
KCl	0,81	0,79	0,78
K ₂ SO ₄	0,96	0,96	0,96

II.7.2.2 MODÉLISATION DES ISOTHERMES DE DÉSORPTION

Onze modèles mathématiques empiriques sont testés pour modéliser les isothermes de désorption à différentes températures pour les quatre variété d'oignon.

Les modèles utilisés sont Langmuir [66], Brunauer Emmet Teller (BET) [161], Guggenheim Anderson Boer (GAB) [163], Henderson [162], [165], Halsey [162], Iglesias-Chirfie [166], Oswin [162], [165], Caurie [162], Smith [167], Peleg [168] et Chung-Pfost [165].

Les équations correspondantes, leurs domaines de validité ainsi que les référence et les constantes sont présentés dans le **Tableau XXX**.

Tableau XXX : Récapitulatif des équations des modèles empiriques appliqués à la modélisation.

Nom du modèle	Expression du modèle	Paramètres	Domaine aw validité
Langmuir	$X_{eq} = 1/(A + B A_w^{C-1})$		CC
BET	$X_{eq} = X_m C A_w / [(1 - A) * (1 - A_w + C a_w)]$		0 -0,45
GAB	$X_{eq} = X_m C K A_w / [(1 - K A_w) * (1 - K A_w + C A_w)]$		0 – 0,93
Halsey	$X_{eq} = (B / \ln A_w)^{1/A}$		0,10 – 0,80
Henderson	$X_{eq} = [- \ln(1 - A_w) / B]^{1/A}$	B > 0 A ≥ 1	CC
Iglesias & Chirife	$X_{eq} = A + B [A_w / (1 - A_w)]$		0,10 – 0,80
Oswin	$X_{eq} = A [A_w / (1 - A_w)]^B$	A > 0 0 < B ≤ 1	CC
Caurie	$X_{eq} = A \exp(-B A_w)$		0 – 0,85
Smith	$X_{eq} = C_1 - C_2 \ln(1 - A_w)$		CC
Peleg	$X_{eq} = K_1 A_w^{n_1} + K_2 A_w^{n_2}$	n ¹ <1 et n ² >1	CC
Chung-Pfost	$X_{eq} = 1/A_1 * (- \ln A_w / A_2)$	A1 > 0 A2 ≥ 1	

Légende : Brunauer Emmet Teller (BET), Guggenheim Anderson Boer (GAB), Courbe Complète (CC).

La méthode des moindres carrés est utilisée pour déterminer le meilleur modèle. Les paramètres statistiques sont le R² qui doit être proche de 1 et le χ² proche de 0 pour le meilleur modèle avec :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{eq\ pred,i} - \bar{X}_{eq\ exp})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{eq\ exp,i} - \bar{X}_{eq\ exp})^2} \quad \text{Équation 38}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{eq\ exp,i} - X_{eq\ pred,i})^2}{n_{exp} - N} \quad \text{Équation 39}$$

Avec N : le nombre de paramètres de chaque modèle et n_{exp} : le nombre de données expérimentales.

II.7.2.3 PROPRIÉTÉS THERMODYNAMIQUES

II.7.2.3.1 CHALEUR NETTE ISOTERIQUE ET CHALEUR ISOTERIQUE DE DESORPTION

L'équation de Clausius Clapeyron permet de déterminer la chaleur nette isotérique (Q_{n st}) de désorption à partir des isothermes [161], [163], [169]–[171].

$$\frac{\partial \ln (aw)}{\partial(T)} = \frac{Q_{n\ st}}{R T^2} \quad \text{Équation 40}$$

Pour des teneurs en eau d'équilibre fixées, comprises entre 5 % et 40 %, les activités de l'eau aux températures 50 °C, 55 °C, 60 °C et 65 °C sont calculées en utilisant l'équation du modèle mathématique permettant de modéliser au mieux les isothermes de désorption expérimentaux à ces températures données. L'intégration de l'Équation 40 permet d'obtenir l'évolution du logarithme Népérien de l'activité de l'eau en fonction de l'inverse de la température. En supposant que la chaleur nette isotérique demeure constante en fonction de la température [160], l'équation de ces courbes dites isotères (courbe dont l'ensemble des points ont la même teneur en eau d'équilibre) est :

$$\ln Aw = - \frac{Q_{n\ st}}{R} * \frac{1}{T} + b \quad \text{Équation 41}$$

Les pentes de ces isotères permettent de calculer la chaleur nette isotérique de désorption ($Q_{n\ st}$ en KJ mol⁻¹). Cette dernière correspond à l'énergie nécessaire à la libération des molécules d'eau des morceaux d'oignon. Elle renseigne ainsi sur le degré de liberté de l'eau et la nature des liaisons. Par conséquent la chaleur isotérique de désorption (Q_{st}) nécessaire pour déshydrater le produit est la somme entre cette chaleur nette isotérique de désorption et l'énergie de vaporisation de l'eau :

$$Q_{st} = Q_{n\ st} + Lvap \quad \text{Équation 42}$$

Avec $Lvap$, la chaleur latente de vaporisation de l'eau comprise entre 42,20 et 42,84 KJ mol⁻¹ dans la plage de température de 50 à 65 °C. La variation étant négligeable, la chaleur latente moyenne de vaporisation utilisée est de 42,52 KJ mol⁻¹ [17].

Quant à l'entropie de désorption (ΔS en KJ mol⁻¹K⁻¹), elle est calculée à partir des valeurs (b) de l'Équation 41, déduites de l'intersection entre ces isotères et l'axe des ordonnées :

$$b = \frac{\Delta S}{R} \quad \text{Équation 43}$$

II.7.2.3.2 THEORIE DE LA COMPENSATION ENTHALPIE – ENTROPIE ET ENERGIE LIBRE

La théorie de la compensation enthalpie-entropie indique une compensation entre la chaleur nette isotérique et l'entropie de désorption. Cette théorie repose sur la relation linéaire entre ces deux énergies [167], [172]–[174]. La pente de cette droite correspond à la température, à laquelle toutes les réactions se déroulent à la même vitesse, dite température isocinétique (T_{iso}) :

$$Q_{n\ st} = T_{iso} \Delta S + \Delta G \quad \text{Équation 44}$$

La théorie de la compensation enthalpie-entropie n'est valable que si la température isocinétique est différente de la température harmonique (T_{harm}). Cette dernière dépend du nombre d'isothermes et est définie par :

$$T_{\text{harm}} = - \frac{n}{R \sum_{i=1}^n (1/T)} \quad \text{Équation 45}$$

Avec n le nombre d'isotherme de désorption et T la température de désorption.

II.7.2.4 COMPARAISON ÉCONOMIQUE DES MODES DE SÉCHAGE À L'ÉTUVE ET EN SERRE SOLAIRE

La capacité en produit humide et le débit évaporatoire aussi bien à l'étuve qu'en serre solaire sont déterminés à partir des cinétiques de séchage (**Figure 26** et **Figure 27**), des masses initiales et de celles des produits séchés. Afin de faciliter la comparaison, la capacité en produit humide et le débit évaporatoire sont exprimés en Kg /h m² en tenant compte des durées de séchage et des surfaces des plateaux de l'étuve et de celles des claies de séchage au niveau de la serre. (**Tableau XXXI**).

Tableau XXXI : Caractéristiques de l'étuve et de la serre solaire.

	Puissance	Dimension Étuve / Serre (m)			Dimension plateau / compartiment claie (m)	
		Longueur	Largeur	Hauteur	Longueur	Largeur
Étuve	2800 W	0,570	0,400	0,480	0,558	0,355
Serre	6,1 KWh/m ² j	14	6,4	2,95	0,74	0,71

L'étuve ne dispose que de deux plateaux (1kg d'oignon par plateaux) et la serre peut contenir environ 15 à 20 claies maximum (environ 4 kg par compartiment soit 16 kg d'oignon par claies) Cette répartition permet d'obtenir une monocouche. Dans le cadre de nos essais, la quantité d'oignons disponible étant insuffisante, 12kg d'oignons ont été utilisés par claie.

La capacité en produits à l'état frais (C_{m0}) et le débit évaporatoire ($D_{\text{évap}}$) sont calculés à partir des équations suivantes :

$$C_{m0} = - \frac{m_0}{\Delta t * S} \quad \text{Équation 46}$$

Avec m_0 la masse de produit avant séchage, Δt la durée du séchage et S la surface du plateau ou de la claie.

$$D_{\text{évap}} = - \frac{m_e \text{ évap}}{\Delta t * S} \quad \text{Équation 47}$$

Avec $m_e \text{ évap}$ la masse d'eau évaporée.

L'énergie disponible (Q_{disp}) calculée à partir de la puissance et de la durée de fonctionnement de l'étuve permettent d'estimer le coût du séchage à l'étuve en se référant aux tarifs du KWh (90,47 FCFA si 100 KWh, 101,64 FCFA si 400 KWh et 112,65 FCFA si > 500 KWh) de la Société Nationale d'Électricité du Sénégal (SENELEC). En ce qui concerne la serre (serre implantée à l'ESP dans le cadre du projet aval fonio n° AURG/2/161/2012), l'énergie disponible est déterminée à partir de l'énergie cumulée par jour, la surface absorbante et le pourcentage d'énergie absorbée par le film thermique. Dans les conditions les plus défavorables, l'énergie fournie par le rayonnement solaire est d'environ 6 KWh / m². La couverture de la serre est un film incolore thermique EN 200 microns d'une durée de vie d'environ trois ans, avec une transmission lumineuse totale de 89 % dont 59 % en transmission directe, 30 % en transmission diffuse et 19 % en thermicité. Toute la surface de la serre absorbe l'énergie solaire. L'estimation du coût du séchage en serre solaire est faite en s'appuyant sur les coûts d'achat, d'installation, d'entretien et de fonctionnement évalués environ entre 9 et 10 millions de FCFA (projet aval fonio). Le coût du séchage en serre solaire est estimé par :

$$\text{Coût séchage serre} = \frac{\text{Coût investissement}}{\text{Durée vie film} * N_{juti} * D_{\text{évap}}} \quad \text{Équation 48}$$

Avec N_{juti} : le nombre de jours d'utilisation par an 200 j au minimum et 280 j au maximum.

L'évolution de la chaleur nette isotérique de désorption en fonction de la teneur en eau d'équilibre, (établie à partir de l'Équation 41), ainsi que la chaleur isotérique (Équation 42) permettent de calculer l'énergie nécessaire pour atteindre les teneurs en eau des produits séchés.

II.7.3 RÉSULTATS

II.7.3.1 DÉTERMINATION DES ISOTHERMES DE DÉSORPTION

L'évolution des teneurs en eau d'équilibre (calculée à partir de l'Équation 37) en fonction de l'activité de l'eau, reflète que l'allure des isothermes de désorption des quatre variétés sont sensiblement identiques. Les valeurs de teneur en eau d'équilibre et de l'activité de l'eau représentées sont des valeurs moyennes des trois mesures effectuées avec respectivement des écarts types compris entre 0,0028 0,0047 ; 0,002 et 0,005.

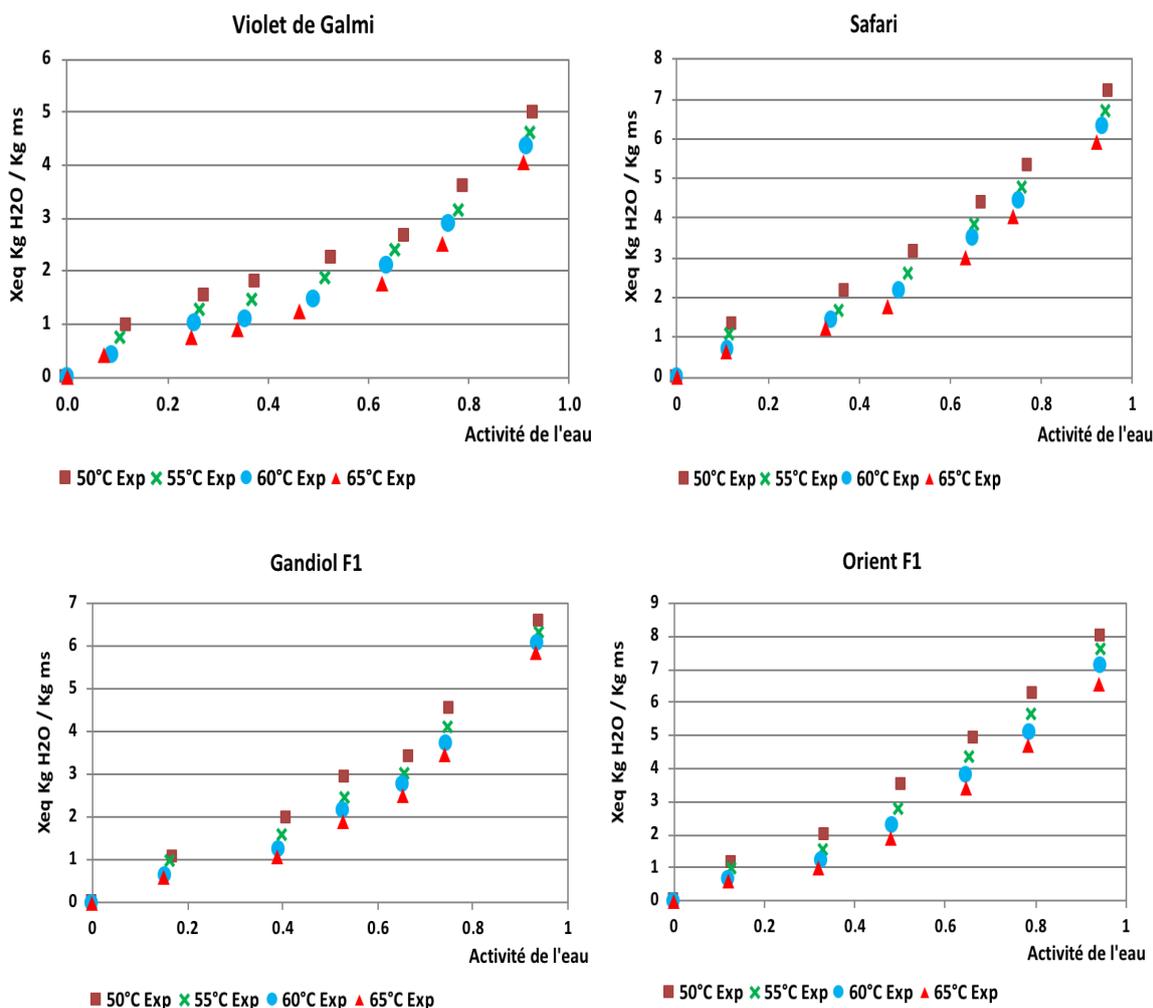


Figure 40 : Isotherme de désorption des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 aux températures 50,55,60 et 65 °C.

Les coefficients de Lin compris entre 0,997355 et 0,999817 pour le test de concordance des mesures de la teneur en eau d'équilibre et de l'activité de l'eau révèle une parfaite concordance entre les mesures effectuées.

Quelle que soit la variété, plus la température augmente plus la teneur en eau d'équilibre et l'activité de l'eau décroît (**Figure 40**). Cette décroissance est plus marquée pour la variété Orient

F1, suivie respectivement des variétés Gandiol F1, Safari et Violet de Galmi toutes températures confondues.

Aussi bien au sein d'une même variété qu'entre les variétés, les tests de comparaison des teneurs en d'équilibre moyennes aux différentes températures révèle une absence de différence significative (valeur de $p > 5 \%$).

II.7.3.2 MODÉLISATION DES ISOTHERMES DE DÉSORPTION

Parmi les onze modèles mathématiques testés, seuls quatre (**Tableau XXXII**) sont présentés pour le choix du meilleur modèle car les sept autres (BET, GAB, Halsey, Iglesias-Chirfie, Caurie, Smith et Chung-Pfost) ont des valeurs de R^2 moyen inférieures à 0,6 toutes températures confondues.

Tableau XXXII : Paramètres statistiques déterminés avec les différents modèles testés pour la modélisation des isothermes de désorption des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.

Modèles	Variétés							
	Violet de Galmi		Safari		Gandiol F1		Orient F1	
	Paramètres statistiques moyens							
	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2	R^2	χ^2
Henderson	0,9903	0,0016	0,9922	0,0079	0,9940	0,0017	0,9799	0,0292
Oswin	0,9915	0,0020	0,9644	0,0319	0,9848	0,0121	0,9381	0,0786
Peleg	0,9509	0,0283	0,9876	0,0079	0,9585	0,0151	0,9956	0,0023
Langmuir	0,9737	0,0104	0,9444	0,0086	0,7841	0,5399	0,9276	0,0218

Les valeurs de R^2 moyen et de χ^2 moyen obtenues avec les différents modèles montrent que quelle que soit la température les meilleurs modèles sont Henderson pour les variétés Safari et Gandiol F1, Oswin pour le Violet de Galmi et Peleg pour la variété Orient F1. La comparaison entre les R^2 des modèles Henderson et Oswin testés sur la variété Violet de Galmi traduit une différence non significative avec une valeur de $p (0,67) > 5 \%$, tandis que celle entre les R^2 des modèles de Henderson et Peleg sur la variété Orient F1 révèle une différence significative avec une valeur de $p (4,94 \cdot 10^{-5}) < 5 \%$. Malgré cette différence significative, le modèle Henderson (R^2 de 0,9799 proche de 1) peut également être retenu comme meilleur modèle pour la variété Orient F1.

L'équation du modèle Henderson permettant d'obtenir une moindre dispersion et une meilleure adéquation avec les données expérimentales est :

$$X_{eq} = [-\ln(1 - a_w)/B]^{1/A} \quad \text{Équation 49}$$

La modélisation des isothermes de désorption aux températures (50, 55,60 et 65 °C) avec le meilleur modèle Henderson est présenté sur la **Figure 41**.

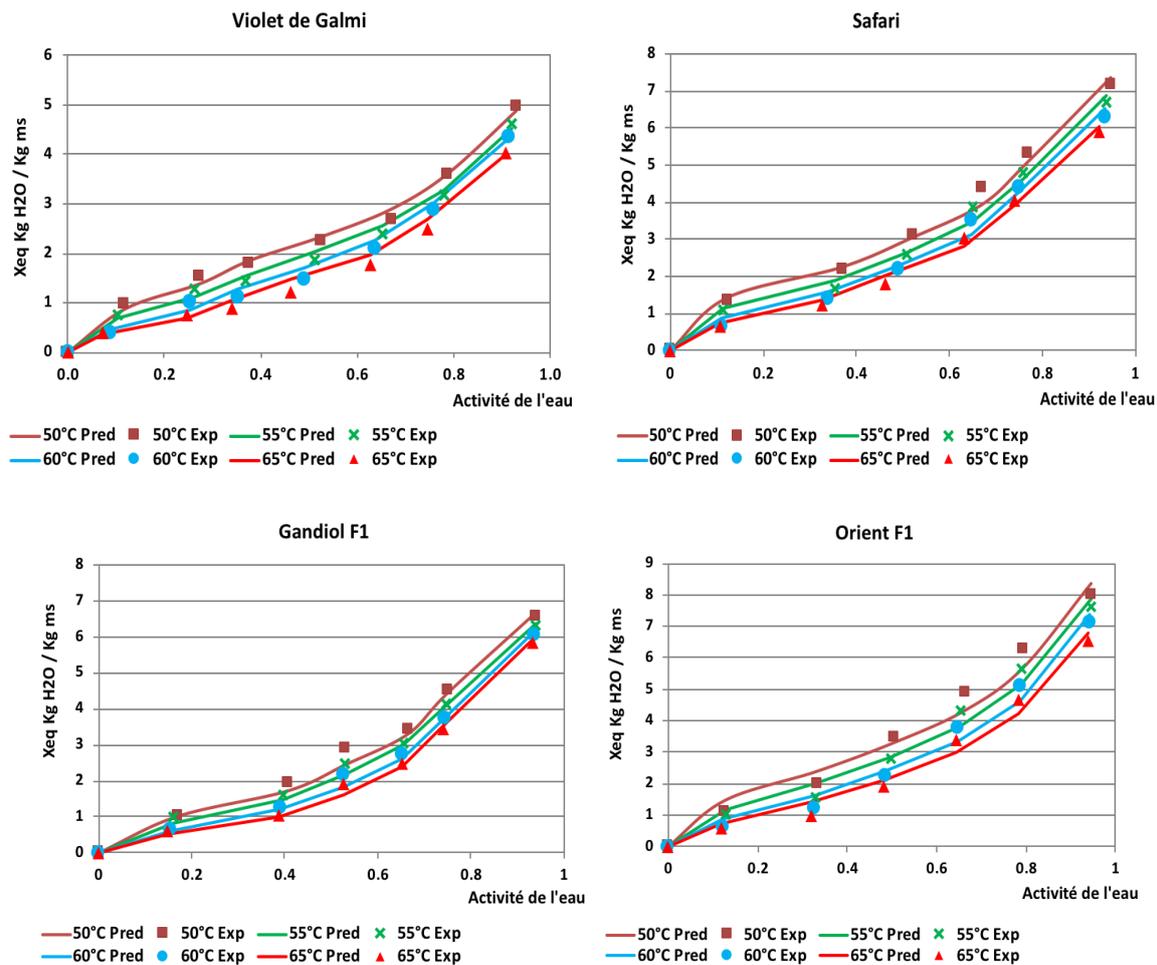


Figure 41 : Isotherme de désorption expérimental et prédit avec le meilleur modèle Henderson.

Quelle que soit la température de désorption, les courbes de la **Figure 41** indique une adéquation quasi parfaite entre les teneurs en eau d'équilibre expérimentales et celles prédites par le modèle Henderson.

Les isothermes de désorption prédits avec le modèle Henderson reflètent que pour des teneurs en eau d'équilibre fixe, chaque augmentation de la température d'un pas de 5°C entraîne une augmentation de l'activité de l'eau. Toutefois, une exception est observée avec les teneurs en eau d'équilibre < 1 Kg d'eau / Kg ms (pour les variétés Violet de Galmi et Gandiol F1) et $< 0,7$ Kg d'eau / Kg ms (pour les variétés Safari et Orient F1). Pour ces faibles teneurs en eau d'équilibre, l'activité de l'eau est identique quelle que soit la température de désorption. Les paramètres du modèle Henderson (**Tableau XXXIII**) montrent que les valeurs du paramètre B augmentent avec la température alors que celles du paramètre A diminuent pour les quatre variétés.

Tableau XXXIII : Paramètres du modèle Henderson pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.

	Variétés							
	Violet de Galmi		Safari		Gandiol F1		Orient F1	
Paramètres du modèle Henderson								
Température (°C)	B	A	B	A	B	A	B	A
50	0,178	1,705	0,093	1,736	0,166	1,491	0,091	1,635
55	0,256	1,523	0,142	1,547	0,219	1,372	0,136	1,482
60	0,367	1,302	0,196	1,401	0,301	1,218	0,198	1,337
65	0,468	1,175	0,249	1,292	0,365	1,124	0,245	1,275

Les paramètres du modèle Henderson évoluent de façon linéaire en fonction de la température. A chaque augmentation de la température d'un pas de 5°C, le paramètre B de la variété Violet de Galmi plus élevé, augmente plus vite (en moyenne + 0,097), suivi de celui de la variété Gandiol F1 (en moyenne + 0,067), tandis que ceux des variétés Safari et orient F1 plus faibles sont sensiblement identiques (en moyenne + 0,052). Quant au paramètre A, ceux des variétés Violet de Galmi, safari et Orient F1, quasi similaires, sont plus élevés que celui de la variété Gandiol F1 et leur décroissance se font respectivement de - 0,177 ; - 0,148 ; - 0,120 et - 0,122. Toutefois d'une variété à une autre, il n'existe pas de différence significative entre l'évolution des paramètres B et A en fonction de la température (valeurs de p > 5 %).

II.7.3.3 PROPRIÉTÉS THERMODYNAMIQUES

II.7.3.3.1 DETERMINATION DE LA CHALEUR ISOTERIQUE DE DESORPTION

Les courbes du logarithme Népérien de l'activité de l'eau en fonction de l'inverse de la température permettant de calculer la chaleur nette isotérique de désorption des quatre variétés sont présentées sur la **Figure 42**. Les activités de l'eau sont calculées pour des valeurs de teneur en eau d'équilibre fixes (5, 15, 25, 35 et 40 %) à partir de l'**Équation 49** et des valeurs des paramètres B et A aux différentes températures (**Tableau XXXIII**).

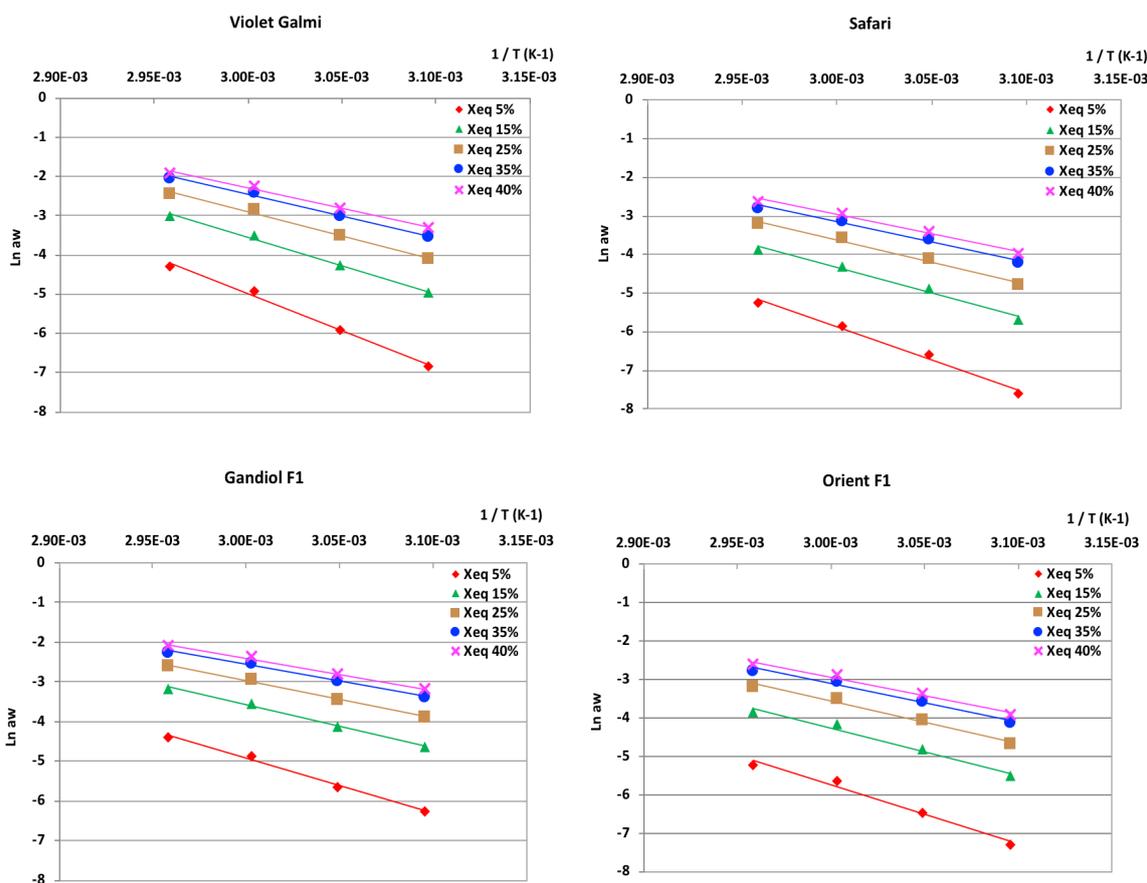


Figure 42 : Évolution du Logarithme Népérien de l'activité de l'eau en fonction de l'inverse de la température pour des teneurs en eau d'équilibre de 5, 15, 25, 35 et 40 %.

Les courbes de tendance obtenues par régression linéaire (**Figure 42**), sont des droites dont les pentes augmentent lorsque les valeurs des teneurs en eau d'équilibre diminuent. Une bonne corrélation est observée pour les quatre variétés avec des valeurs de R^2 comprises entre 0,982 et 0,994. Les valeurs de la chaleur nette isotérique (**Tableau XXXIV**), calculées pour les quatre variétés à partir des pentes de ces courbes de tendance de l'**Équation 41**, montrent que la variété Violet de Galmi nécessite une chaleur nette isotérique de désorption plus importante, suivie dans l'ordre décroissant de celles des variétés Safari, Orient F1 et Gandiol F1.

Tableau XXXIV : Chaleur nette isotérique de désorption des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 pour des teneurs en eau d'équilibre de 5, 15, 25, 35 et 40 %.

Chaleur nette isotérique $Q_{n\ st}$ (KJ / mol)

Variétés

Xeq (%)	Violet de Galmi	Safari	Gandiol F1	Orient F1
5	156,92	141,37	115,89	127,39
15	119,92	109,56	90,91	103,25
25	102,37	95,63	78,65	90,96
35	90,42	86,17	70,34	82,80
40	85,59	82,39	66,99	79,84

L'évolution de la chaleur nette isotérique en fonction de la teneur en eau d'équilibre (**Figure 43**) est représentée par un polynôme de degré 3 avec des coefficients de corrélation de l'ordre de 0,999.

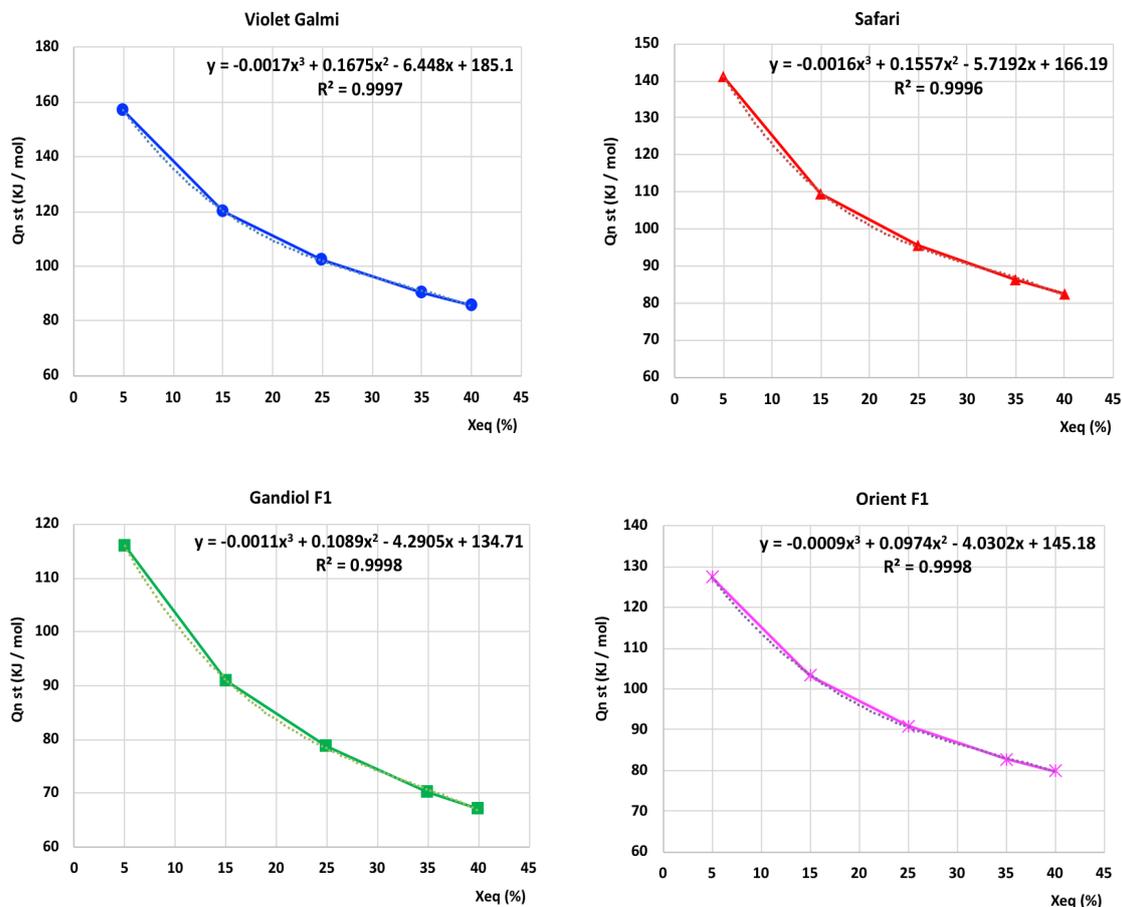


Figure 43 : Évolution de la chaleur nette isotérique de désorption en fonction de la teneur en eau d'équilibre pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.

Quelle que soit la variété, plus la teneur en d'équilibre diminue, plus la chaleur nette isotérique de désorption augmente. Pour chaque réduction de la teneur en eau d'équilibre de 10 %, la chaleur nette isotérique de désorption est multipliée par un facteur compris entre 1,10 et 1,130 pour les quatre variétés. La chaleur isotérique de désorption (calculée à partir de l'Équation 42) à différentes teneurs en eau d'équilibre pour les quatre variétés est présentée dans le **Tableau XXXV**.

Tableau XXXV : Chaleur isotérique de désorption des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 pour des teneurs en eau d'équilibre de 5, 15, 25, 35 et 40 %.

Chaleur isotérique Qst (KJ / mol)				
Variétés				
Xeq (%)	Violet de Galmi	Safari	Gandiol F1	Orient F1
5	199,44	183,89	158,41	169,91
15	162,44	152,08	133,43	145,77
25	144,89	138,15	121,17	133,48
35	132,94	128,69	112,86	125,32
40	128,11	124,91	109,51	122,36

L'évolution de la chaleur isotérique de désorption des quatre variétés en fonction de la teneur en eau d'équilibre est identique à celle de la chaleur nette isotérique de désorption.

II.7.3.3.2 THEORIE DE LA COMPENSATION ENTHALPIE-ENTROPIE ET ÉNERGIE LIBRE

L'évolution de la chaleur nette isotérique de désorption en fonction de l'entropie de désorption (*Figure 44*) est linéaire.

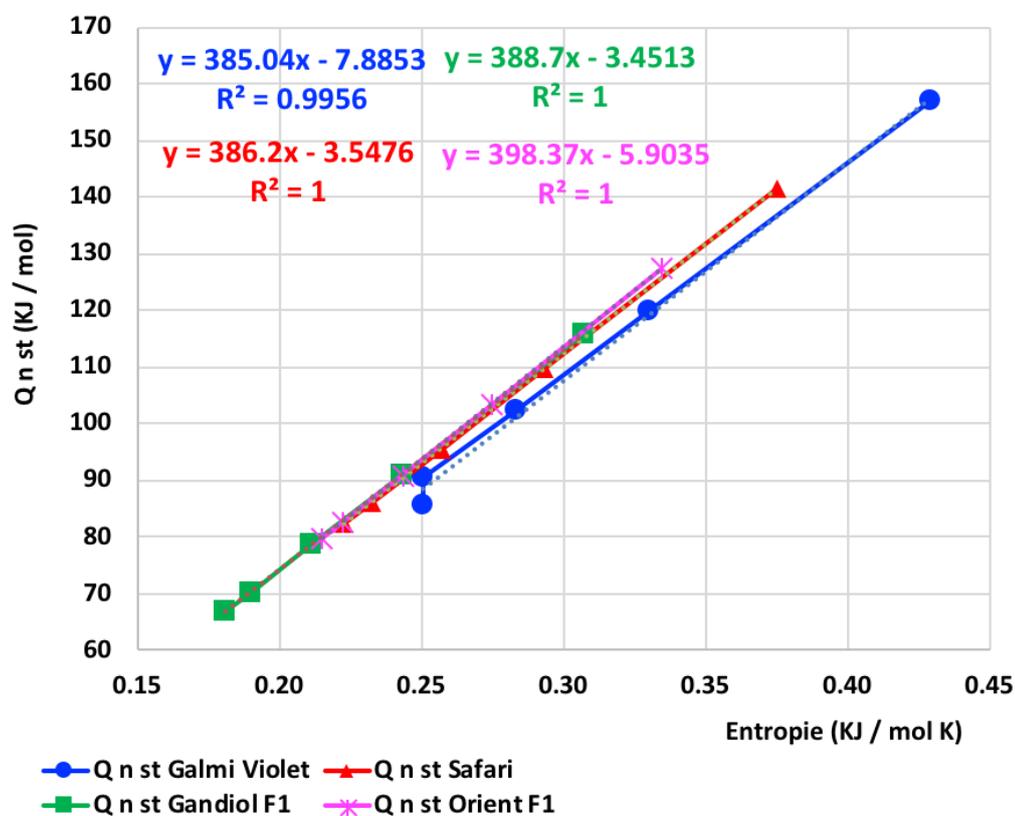


Figure 44 : Évolution de la chaleur nette isotérique de désorption en fonction de l'entropie.

Les courbes de tendance établies par régression linéaire (**Figure 44**) révèlent une corrélation parfaite pour les quatre variétés avec des valeurs de R^2 comprises entre 0,999 et 1. Les températures isocinétiques déduites des pentes de ces courbes de tendance sont pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 respectivement de 385,04 ; 386,2 ; 388,7 et 398,37 °K.

Ces températures isocinétiques, sont toutes différentes de la température harmonique de 329,95 °K (calculée à partir de l'**Équation 45** selon les conditions expérimentales de détermination des isothermes de désorption des quatre variétés d'oignon).

Les valeurs de l'énergie libre à la température isocinétique de désorption de chacune des variétés (**Tableau XXXVI**) sont toutes négatives.

Tableau XXXVI : Énergie libre à la température isocinétique de désorption des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 pour des teneurs en eau d'équilibre de 5, 15, 25, 35 et 40 %.

Énergie libre ΔG (KJ / mol)				
Variétés				
Xeq (%)	Violet de Galmi	Safari	Gandiol F1	Orient F1
5	-8.38	-3.57	-3.38	-5.82
15	-7.23	-3.49	-3.57	-6.06
25	-6.63	-3.57	-3.51	-5.95
35	-6.15	-3.56	-3.42	-5.84
40	-10.98	-3.55	-3.37	-5.85

Le **Tableau XXXVI** reflète que l'énergie libre des variétés Safari, Gandiol F1 et Orient F1 ne varient quasiment pas avec la teneur en eau d'équilibre tandis que celle de la variété Violet de Galmi augmente. Par ailleurs, les valeurs d'énergie libre des variétés Safari et Gandiol F1 sont supérieures à celle de la variété Orient F1 suivie de celle de la variété Violet de Galmi.

II.7.3.4 COMPARAISON ÉCONOMIQUE DES DEUX MODES DE SÉCHAGE

La surface d'un plateau de séchage est de 0,198 m² (surface totale de séchage à l'étuve 0,396 m²) et celle d'un compartiment d'une claie est de 0,525 m² (surface des trois compartiments 1,575 m²).

L'énergie disponible dans la serre est estimée en prenant une surface d'absorption de 90 m² et une transmission lumineuse totale de 89 %. Les capacité en produit humide, débit évaporatoire, rendement énergie disponible, chaleur nette isotérique et chaleur isotérique de désorption en serre solaire et à l'étuve sont présentés respectivement dans les **Tableau XXXVII** et **Tableau XXXVIII**.

Tableau XXXVII : Tableau récapitulatif des capacités en produit humide, débit évaporatoire, énergie nécessaire et disponible pour le séchage en serre solaire à température variable entre 35°C et 65 °C.

Paramètres	Variété			
	Violet de Galmi	Safari	Gandiol F1	Orient F1
Δt (h)	9	8	8	9
m_0 (Kg)	12	12	12	12
$X_{exp, t}$ (ms)	8,23	6,88	8,54	6,89
C_{m0s} (Kg/h m ²)	0,85	0,95	0,95	0,85
$D_{évap s}$ (KgH ₂ O/h m ²)	0,71	0,84	0,77	0,74
Rendement (g/100 g)	16,64	11,55	18,69	13,06
$Q_{n st c s}$ (KJ)	79081,60	78836,14	57097,00	70563,47
$Q_{st c s}$ (KJ)	102710,17	103909,76	80146,95	95208,82
$Q_{disp s}$ (KJ)	1758996	1758996	1758996	1758996

Légende : m_0 : masse d'oignon à l'état frais, $X_{exp, t}$: teneur en eau des oignons séchés, C_{m0s} : la capacité en oignon frais en serre solaire, $D_{évap s}$: le débit évaporatoire en serre solaire, $Q_{n st c s}$ et $Q_{st c s}$: respectivement chaleur nette isotérique et chaleur isotérique de désorption pour le cycle de séchage en serre solaire, $Q_{disp s}$: énergie disponible en serre solaire

Les capacités en produit à l'état frais (C_{m0s}) des variétés d'oignon Safari et Gandiol F1 sont égales (0,95 Kg/h m²) et sont légèrement supérieures à celles des variétés Violet de Galmi et Orient qui sont identiques (0,85 Kg/h m²). Les débits évaporatoires des variétés d'oignon Safari, Gandiol F1, Orient F1 et Violet de Galmi, par ailleurs sensiblement identiques, sont respectivement de 0,84 ; 0,77 ; 0,74 et 0,71 Kg/h m². Malgré les conditions d'absorption des rayons solaires les plus défavorables appliquées, l'énergie disponible dans la serre (1 758 996 KJ) est supérieure à la quantité de chaleur isotérique de désorption utile (381 975, 71 KJ) pour sécher les quatre variétés.

Tableau XXXVIII : Tableau récapitulatif des capacité en produit humide, débit évaporatoire, énergie nécessaire et disponible pour le séchage à l'étuve dans la plage idéale de température de 55 °C à 65 °C.

Variété	T Étuve (°C)	Δt (h)	m _i (Kg)	X _{exp, t} (ms)	C _{m0 e} (Kg/h m ²)	D _{évap e} (Kg H ₂ O/h m ²)	Rendement (g/100 g)	Q _{n st c e} (KJ)	Q _{st c e} (KJ)	Q _{disp e} (KJ)
Violet de Galmi	55	7	2	8,57	0,72	0,61	15,86	13176,49	17151,85	70560
Violet de Galmi	60	6	2	7,96	0,84	0,71	15,45	13472,37	17466,85	60480
Violet de Galmi	65	5	2	6,27	1,01	0,88	13,21	14540,60	18641,05	50400
Safari	55	9	2	8,20	0,56	0,49	12,55	12523,41	16655,00	90720
Safari	60	7	2	8,42	0,72	0,61	14,98	12102,41	16119,24	70560
Safari	65	6	2	7,33	0,84	0,72	14,22	12583,13	16635,84	60480
Gandiol F1	55	9	2	8,99	0,56	0,50	10,86	10315,72	14527,31	90720
Gandiol F1	60	7	2	8,67	0,72	0,62	14,15	10013,40	14069,10	70560
Gandiol F1	65	6	2	6,64	0,84	0,73	13,22	10673,47	14773,55	60480
Orient F1	55	8	2	7,59	0,63	0,54	13,80	11475,32	15547,79	80640
Orient F1	60	7	2	7,18	0,72	0,61	15,38	11370,98	15368,89	70560
Orient F1	65	5	2	8,33	1,01	0,88	13,31	11352,19	15447,78	50400

Légende : C_{m0 e} : capacité en oignon à l'état frais à l'étuve, D_{évap e} : débit évaporatoire à l'étuve, Q_{n st c e} et Q_{st c e} : respectivement chaleur nette isotérique et chaleur isotérique de désorption pour le cycle de séchage à l'étuve, Q_{disp e} : énergie disponible à l'étuve.

Le **Tableau XXXVIII** reflète que les capacité en produit humide, débit évaporatoire, chaleur nette isotérique et chaleur isotérique augmentent avec la température de séchage, tandis que l'énergie disponible (calculée à partir de la puissance de l'étuve et de la durée du cycle) décroît du fait de la diminution de la durée du cycle de séchage quand la température augmente. À température identique, la variété Violet de Galmi nécessite plus d'énergie pour le cycle de séchage avec une capacité en produit humide et un débit évaporatoire également supérieur à ceux des trois autres variétés.

II.7.4 DISCUSSION

Les isothermes de désorption des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient, établies à 50, 55, 60 et 65 °C (**Figure 40**), font apparaître qu'à température constante, plus la teneur en eau d'équilibre diminue, plus l'activité de l'eau baisse. Cela est dû au fait que plus la désorption avance à température constante, plus l'eau est liée aux constituants de l'oignon. L'augmentation de la température engendre une diminution de la teneur en eau d'équilibre pour des valeurs d'activité de l'eau fixe. Cet effet de la température s'explique par l'augmentation de l'agitation des molécules d'eau facilitant ainsi la désorption. Cela a été également démontré par des travaux antérieurs sur de nombreux produits alimentaires tels que le citron [175], la menthe verte [170], la citrouille [169], l'ail [171] et différentes variétés d'oignon [160], [161], [163], [164].

Par ailleurs, à température identique, la diminution de la teneur en eau d'équilibre est plus accentuée pour la variété Orient F1 suivie des variétés Gandiol F1, Safari et Violet de Galmi. L'impact de la variété sur les isothermes est lié à la différence de teneur en matière sèche (14,44 %, 11,89 %, 13,01 % et 10,87 % respectivement pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1). En effet, plus la teneur en matière sèche est importante, plus il existe de liaison hydrogène ralentissant ainsi la désorption. Cependant, une exception est notée entre la variété Gandiol F1 et Safari, due à la présence de composés solubles tels que les sucres plus importants probablement au niveau de la variété safari freinant ainsi la désorption comparée à celle de la variété Gandiol F1.

Quant à la modélisation, parmi les onze modèles testés, seuls les modèles Henderson, Oswin et Peleg permettent d'obtenir une dispersion moindre et une meilleure adéquation avec respectivement des valeurs de R^2 comprises entre 0,97 et 0,99 et des valeurs de χ^2 comprises entre 0,0016 et 0,029 (**Tableau XXXII**). Le modèle Henderson décrit bien les isothermes des quatre variétés, tandis que les deux autres ne conviennent pas à toutes (modèle Oswin pour les variétés Violet de Galmi et Gandiol F1 et le modèle Peleg pour les variétés Safari et Orient F1). Ce modèle diffère de ceux trouvés dans la littérature sur la modélisation des isothermes de l'oignon [159]–[164]. De plus, d'après Bouba (2014), le modèle validé pour la variété Violet de Galmi est le modèle Guggenheim Anderson Boer (GAB) différent de notre modèle bien que les variétés soient identiques.

Cette différence corrobore l'importance des pratiques culturales, de la variété, de la forme et de la taille sur les isothermes. Toutefois, l'allure sigmoïdale des isothermes (**Figure 41**) des quatre variétés d'oignon, sur lesquelles ont porté nos expériences, est identique à celle des isothermes de plusieurs produits alimentaires. Les différentes zones observées sont :

- ❖ zone 1 : $A_w < 0,2$ monocouche avec liaison hydrogène entre molécules d'eau et groupements polaires des constituants de l'oignon
- ❖ zone 2 : $0,2 < a_w < 0,65$ couche poly-moléculaires liée à la monocouche par des liaisons hydrogène
- ❖ zone 3 : $A_w > 0,65$ molécules d'eau maintenues facilement dans les espaces entre les différents constituants par des liaisons de Van der Waals plus faibles que les liaisons hydrogènes [17], [164].

Plus les liaisons hydrogènes sont nombreuses, plus la chaleur nette isotérique de désorption est alors importante. Ainsi, pour les teneurs en eau d'équilibre de 5 % (zone 1), la chaleur nette isotérique de désorption (**Tableau XXXIV**) des variétés Violet de Galmi ($156,92 \text{ KJmol}^{-1}$), Safari ($141,37 \text{ KJ mol}^{-1}$), Gandiol F1 ($115,89 \text{ KJ mol}^{-1}$) et orient F1 ($127,39 \text{ KJ mol}^{-1}$), est égale à environ trois fois la chaleur latente de vaporisation de l'eau ($42,52 \text{ KJ mol}^{-1}$). La chaleur nette isotérique de désorption décroît avec l'augmentation de la teneur en eau d'équilibre (zone 2 et zone 3) [164], [169], [171] et est décrite par une fonction polynomiale de degré 3 (**Figure 43**) [170], [175]. Quelle que soit la teneur en eau d'équilibre ciblée, le classement des variétés par ordre décroissant de chaleur nette isotérique de désorption est Violet de Galmi, Safari, Orient F1 et Gandiol F1. Malgré sa teneur en matière sèche plus importante que celle de la variété Safari laquelle est plus importante que celle de la variété Orient F1, la variété Gandiol F1 requiert moins de chaleur nette isotérique. Cette différence s'explique certainement par le fait que la variété Gandiol F1 contient moins de composés solubles que la variété orient F1, laquelle en contient moins que la variété Safari mais également par les types de liaisons différentes dans la couche poly-moléculaire selon la composition des variétés [164], [174], [176]. Tout comme la chaleur nette isotérique, l'entropie de désorption augmente avec la diminution de la teneur en eau d'équilibre. Les transformations internes liées aux évolutions microscopiques du système au fur et à mesure de la réduction de la teneur en eau sont responsables de cette augmentation. Le classement des variétés par ordre décroissant de l'entropie est identique à celui sur la chaleur nette isotérique de désorption.

La linéarité observée sur l'évolution de la chaleur nette isotérique de désorption en fonction l'entropie de désorption (**Figure 44**) ainsi que la différence entre les températures isocinétiques ($385,04$; $386,2$; $388,7$ et $398,37$ °K respectivement pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1) et la température harmonique ($329,95$ °K) confirment la théorie de la compensation enthalpie-entropie lors du séchage des quatre variétés d'oignon. De plus, pour les quatre variétés, les températures isocinétiques supérieures à la température harmonique indique la désorption est contrôlée par la chaleur nette isotérique [167], [171]–[174], [176]. L'énergie libre < 0 (**Tableau XXXVI**) pour des valeurs de teneurs en eau d'équilibre entre 5 et 40 % implique

que la désorption est spontanée. A la température isocinétique, l'énergie libre moyenne, correspondant à l'ordonnée à l'origine des courbes de tendance de l'évolution de la chaleur nette isotérique en fonction de l'entropie de désorption (**Figure 44**), est de -7,89 ; -3,55 ; -3,45 et -5,90 respectivement pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1.

La comparaison des tableaux récapitulatifs (**Tableau XXXVII** et **Tableau XXXVIII**), montre qu'en serre solaire, les capacités en produit humide (comprises entre 0,85 et 0,95 Kg/h m²) et débits évaporatoires (compris entre 0,71 et 0,84 Kg/h m²) sont légèrement supérieures aux valeurs moyennes obtenues à l'étuve toutes température confondues dans la plage idéale de 55 °C à 65 °C (comprises entre 0,71 et 0,86 Kg/h m² pour la capacité en produit humide ; 0,61 et 0,73 Kg/h m² pour le débit évaporatoire). A température fixe à l'étuve, les différences observées s'expliquent par la composition des différentes variétés, mais également les légères variations sur les teneurs en eau finale garantissant la stabilité des produits séchés entraînant des variations sur les durées des cycles de séchage.

Dans la plage idéale de température de séchage de 55 °C à 65 °C à l'étuve, le coût moyen du séchage des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 est respectivement de 148,73 ; 147,13 ; 145,15 et 147,56 FCFA / Kg H₂O h.

Quant au séchage en serre solaire, pour un cycle de séchage de 6h par jour en moyenne, un coût d'investissement d'environ 9 million, le coût du séchage est de :

- ❖ 65,17 ; 54,59 ; 59,38 et 62,48 FCFA / Kg H₂O h respectivement pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 (280 jours d'utilisation) ;
- ❖ 91,24 ; 76,43 ; 83,14 et 87,48 FCFA / Kg H₂O h respectivement pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 (200 jours d'utilisation).

La superficie et l'énergie disponible au niveau de la serre solaire permet de sécher environ 200 Kg d'oignon par jour pour un coût moyen minimum et maximum respectivement de 10862,39 et 15207,34 FCFA /jour. L'énergie nécessaire pour sécher les 200kg étant d'environ 480 KWh, le coût du séchage électrique serait d'environ 47 778,32 FCFA.

En résumé, les allures des isothermes des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 sont sigmoïdales. Aussi bien la température que la variété, ont un effet sur les isothermes de désorption. En effet, l'augmentation de la température entraîne une diminution de la teneur en eau d'équilibre pour une activité de l'eau fixe, tandis que pour une teneur en eau identique, l'augmentation de la température entraîne une augmentation de l'*a_w*, favorisant ainsi l'altération de la qualité. Toutefois cet effet de la température sur l'activité de l'eau et les teneurs en eau d'équilibre des quatre variétés est moindre en fin de désorption (*a_w* < 0,2 pour les quatre variétés ; X_{eq} < 1 kg / kg ms pour les variétés Violet de Galmi et Gandiol F1 et 0,7 kg / kg ms pour safari et Orient F1). Quant à la chaleur nette isotérique de désorption (156,92 ; 141,37 ;

115,89 et 127,39 KJ mol⁻¹ respectivement pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et orient F1), plus importante pour les faibles teneurs en eau d'équilibre, elle est différente selon les variétés du fait de la variation des types de liaisons. L'effet de la variété est cependant faible pour les teneurs en eau d'équilibre < 15 % et celles > 35 %). En cas de mélange des variétés, le modèle Henderson décrit mieux les isothermes de désorption contrôlés par la chaleur nette isotérique. Par ailleurs, la variété Violet de Galmi avec la chaleur nette isotérique de désorption la plus élevée est la variété limitante. Le coût du séchage en serre est 3 à 4 fois moins cher que celui du séchage électrique.

II.8 IMPACT DU SÉCHAGE SUR LES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES ET BIOCHIMIQUES DES POUDRES D'OIGNON

Des travaux antérieurs ont montré que le mode d'utilisation des produits alimentaires peut dans certains cas entraîner une augmentation des constituants alimentaires et dans d'autre une diminution [30], [41], [102], [111]. La qualité nutritionnelle étant par ailleurs l'un des critères déterminants pour la conception d'un séchoir, les caractéristiques physico-chimiques, les macronutriments et les micronutriments essentiels [14] des variétés d'oignons séchés à différentes température à l'étuve et en serre solaires sont déterminés.

En se référant à la table de composition des aliments 2017, une différence de composition est observée entre les oignons en flocons déshydratés et les oignons en poudre (*Annexe J*). Toutefois, dans le cadre de ces travaux de recherches, la caractérisation porte uniquement sur les poudres dont l'utilisation est la plus apparente.

II.8.1 MATÉRIELS

II.8.1.1 MATÉRIEL VÉGÉTAL

Les différentes variétés d'oignon (Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1), leur préparation et le diagramme de production des poudres d'oignon sont exposés dans les paragraphes *II.2.1*, *II.2.2* et *II.2.3*.

Les échantillons d'oignon, séchés dans les conditions optimales à l'étuve aux températures 50 °C, 55 °C, 60 °C, 65 °C et 70 °C, ainsi qu'en en serre solaire à des températures variables, sont broyés et tamisés.

II.8.1.2 MATÉRIEL D'ANALYSE

En plus des matériels décrits au niveau du sous - chapitre *II.3.1.*, un broyeur de cuisine et un tamis de diamètre 800 μ sont utilisés pour la préparation des échantillons de poudre d'oignon.

II.8.2 MÉTHODES

Les différentes analyses effectuées sur les poudres d'oignon concernent la teneur en eau, l'activité de l'eau, le pH, l'acidité titrable, les polyphénols totaux, les cendres et les macroéléments. Le dosage des sels minéraux a porté essentiellement sur les macroéléments sodium, le potassium, le magnésium et le calcium dont les teneurs sont les plus importantes dans les oignons [14]. Les méthodes sont présentées dans le sous - chapitre *II.3.2*. Tous les résultats sont exprimés en g / 100 g ms.

II.8.3 RÉSULTATS

II.8.3.1 CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUES

Les teneurs en eau et en Acidité Titrable (AT), ainsi que le taux de cendre, l'activité de l'eau et la valeur du pH des différents échantillons séchés sont présentés sur les **Figure 45** et **Figure 46**.

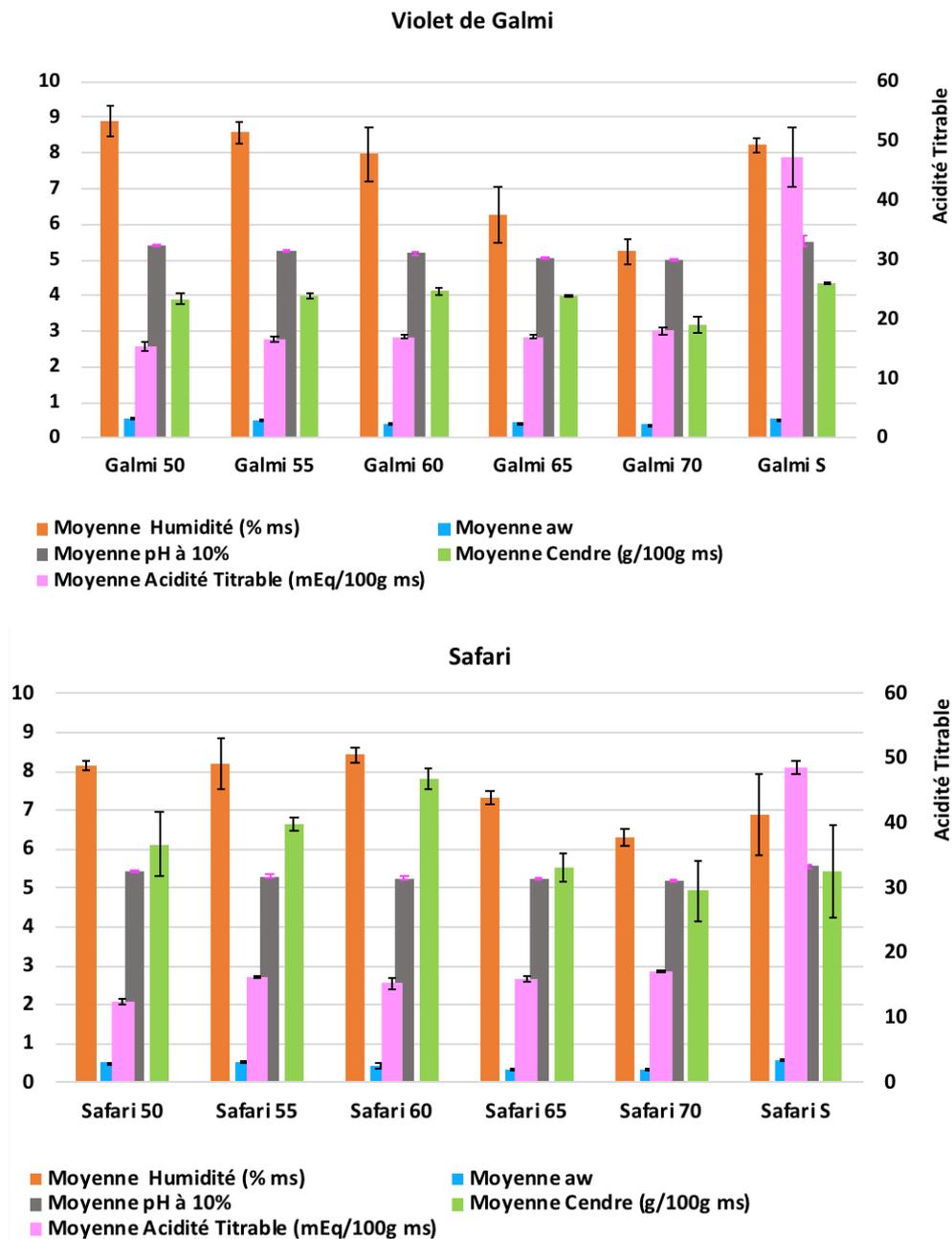


Figure 45 : Caractéristiques physico-chimiques (humidité, activité de l'eau, pH, acidité titrable et cendre) des poudres d'oignons Violet de Galmi et Safari obtenues dans les conditions optimales de séchage à l'étuve et en serre solaire. (Galmi S et Safari S correspondent au séchage en serre).

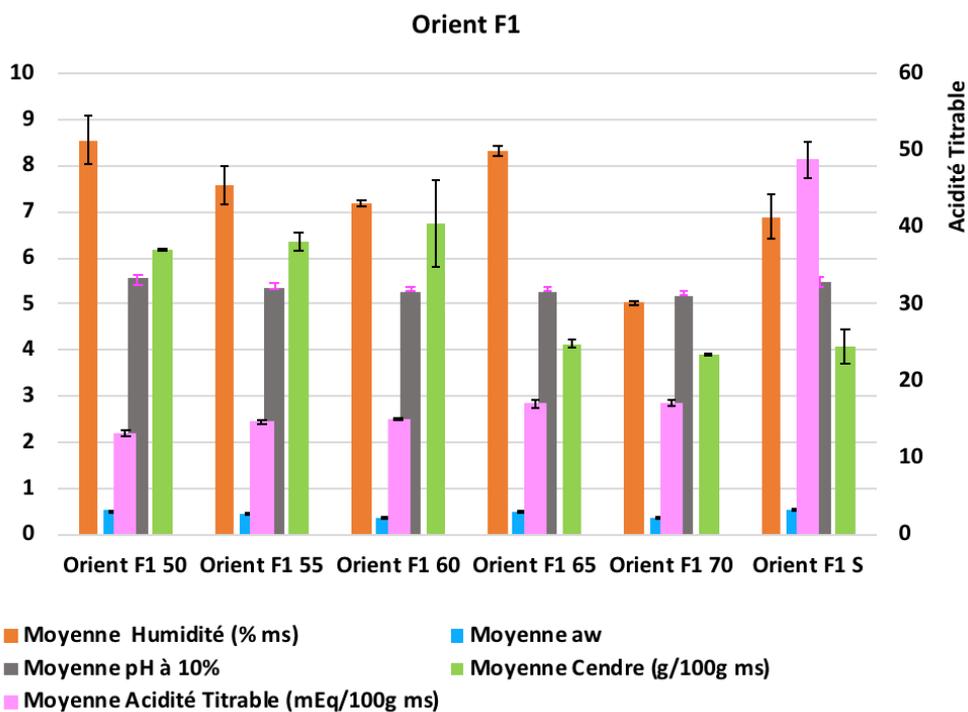
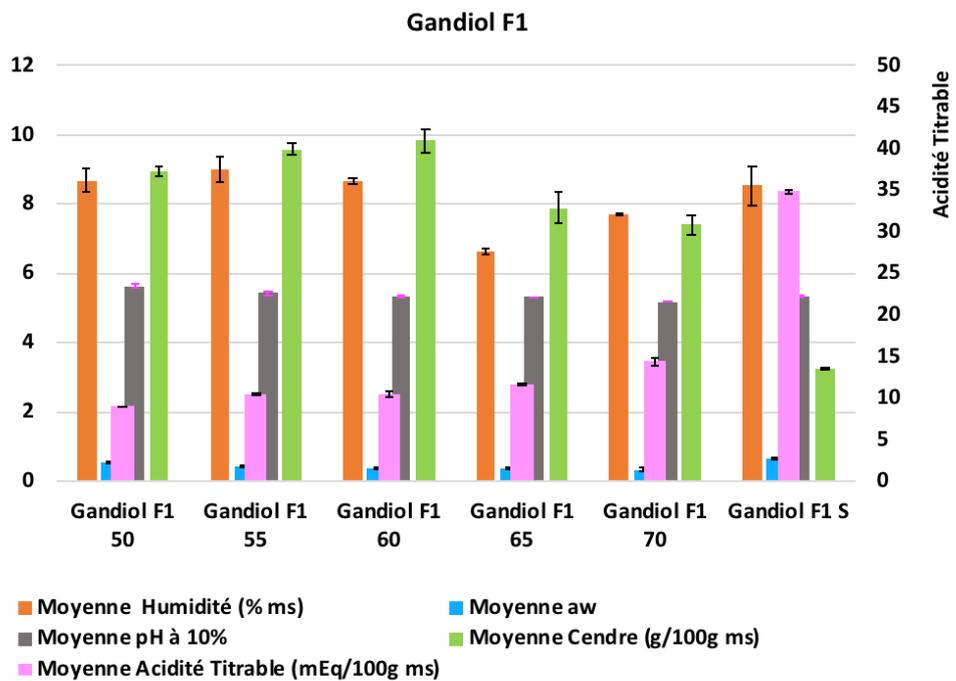


Figure 46 :Caractéristiques physico-chimiques (humidité, activité de l'eau, pH, acidité titrable et cendre) des poudres d'oignons Gandiol F1 et Orient F1 obtenues dans les conditions optimales de séchage à l'étuve et en serre solaire.
(Gandiol F1 S et Orient F1 S correspondent au séchage en serre).

Les **Figure 45** et **Figure 46** reflètent que :

- ❖ les valeurs d'humidité ($5,023 \pm 0,027$ et $8,987 \pm 0,372$ g / 100 g ms) des poudres d'oignon aussi bien celles obtenues par séchage à l'étuve qu'en serre solaire se situent toutes dans la zone de stabilité des produits séchés (8 ± 2 %);
- ❖ les valeurs d'activité de l'eau pour les quatre variétés sont toutes inférieures ou égales à $0,675 \pm 0,041$ permettant d'éviter le développement microbien (**Figure 5**) ;
- ❖ toutes les poudres d'oignon ont des valeurs de pH comprises entre $5,005 \pm 0,007$ et $5,650 \pm 0,071$. Ces valeurs sont décroissantes (divisé par un facteur de l'ordre de 1,001 à 1,028 pour chaque pas de 5°C) avec l'augmentation de la température de séchage à l'étuve tandis que l'acidité titrable augmente (multiplié par un facteur de l'ordre de 1,010 à 1,304 pour chaque pas de 5°C). L'inverse est cependant observée pour l'acidité titrable de la variété Violet de Galmi (entre 60 et 65 °C) et celle des variétés Safari et Gandiol F1 (entre 55 et 60 °C). Par ailleurs, l'acidité titrable des variétés séchées en serre solaire est supérieure (facteur multiplicatif situé entre 2,777 et 3,833) à celle des variétés séchées à l'étuve quelle que soit la température ;
- ❖ pour l'ensemble des variétés, le taux de cendre des poudres supérieur à celui des variétés d'oignon à l'état frais, augmente avec la température de séchage à l'étuve et décroît à partir de 65 °C. Ces taux de cendres sont supérieurs à celui de la table de composition des aliments (4,04 g / 100 g portion comestible d'oignon en poudre), exception faite des variétés Violet de Galmi aux températures 50 °C, 55 °C, 65 °C et 70 °C, Gandiol F1 en serre solaire et Orient F1 à 70 °C.

II.8.3.2 CARACTÉRISATION BIOCHIMIQUE

II.8.3.2.1 MACRONUTRIMENTS

Les **Figure 47** et **Figure 48** exposent les teneurs en protéines, ST et SR des poudres d'oignon obtenues après séchage à l'étuve et en serre solaire.

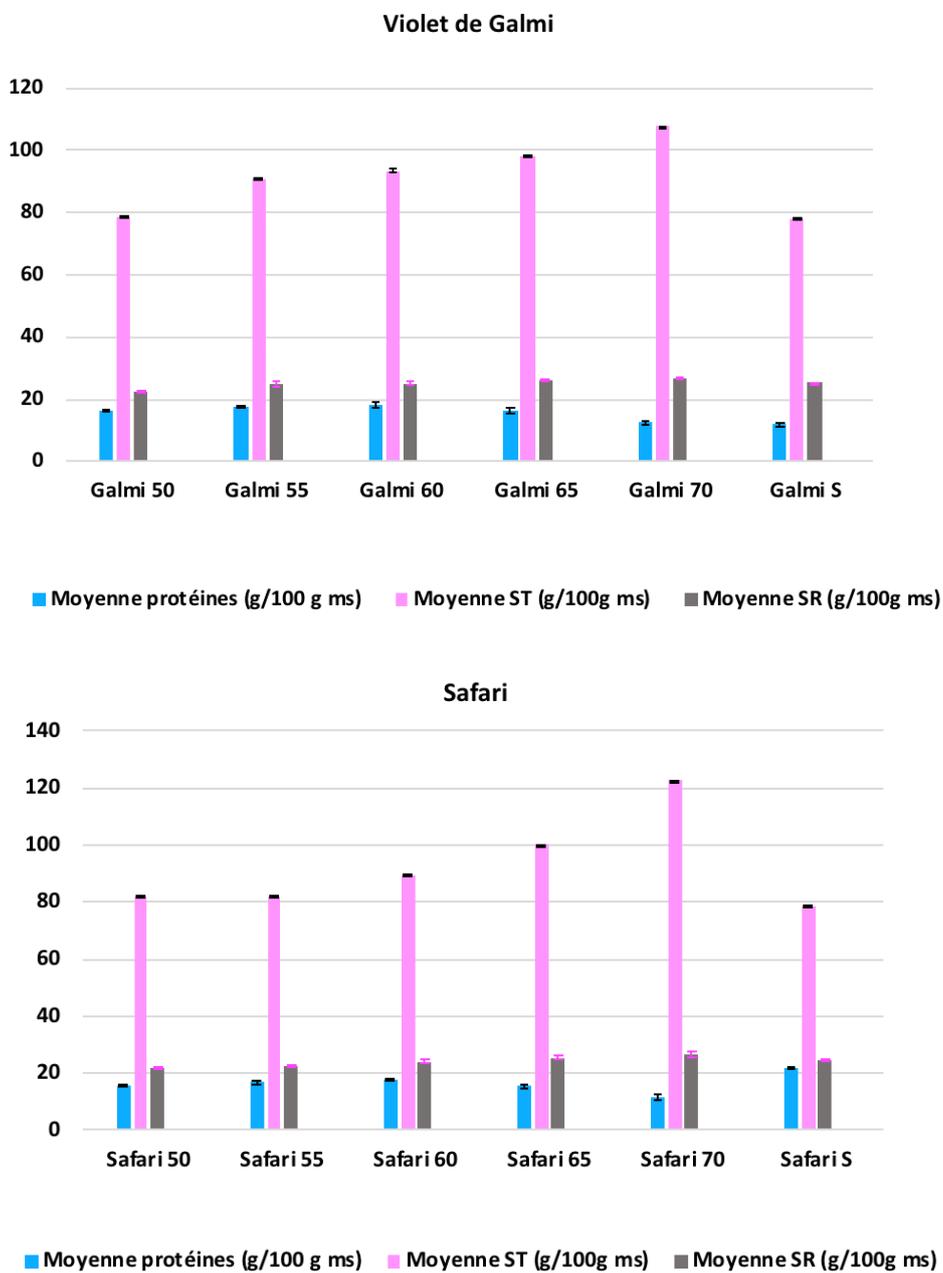


Figure 47 : Teneur en protéines, Sucres Totaux (ST) et Sucres Réducteurs (SR) des poudres d'oignons Violet de Galmi et Safari obtenues dans les conditions optimales de séchage à l'étuve et en serre solaire. (Galmi S et Safari S correspondent au séchage en serre).

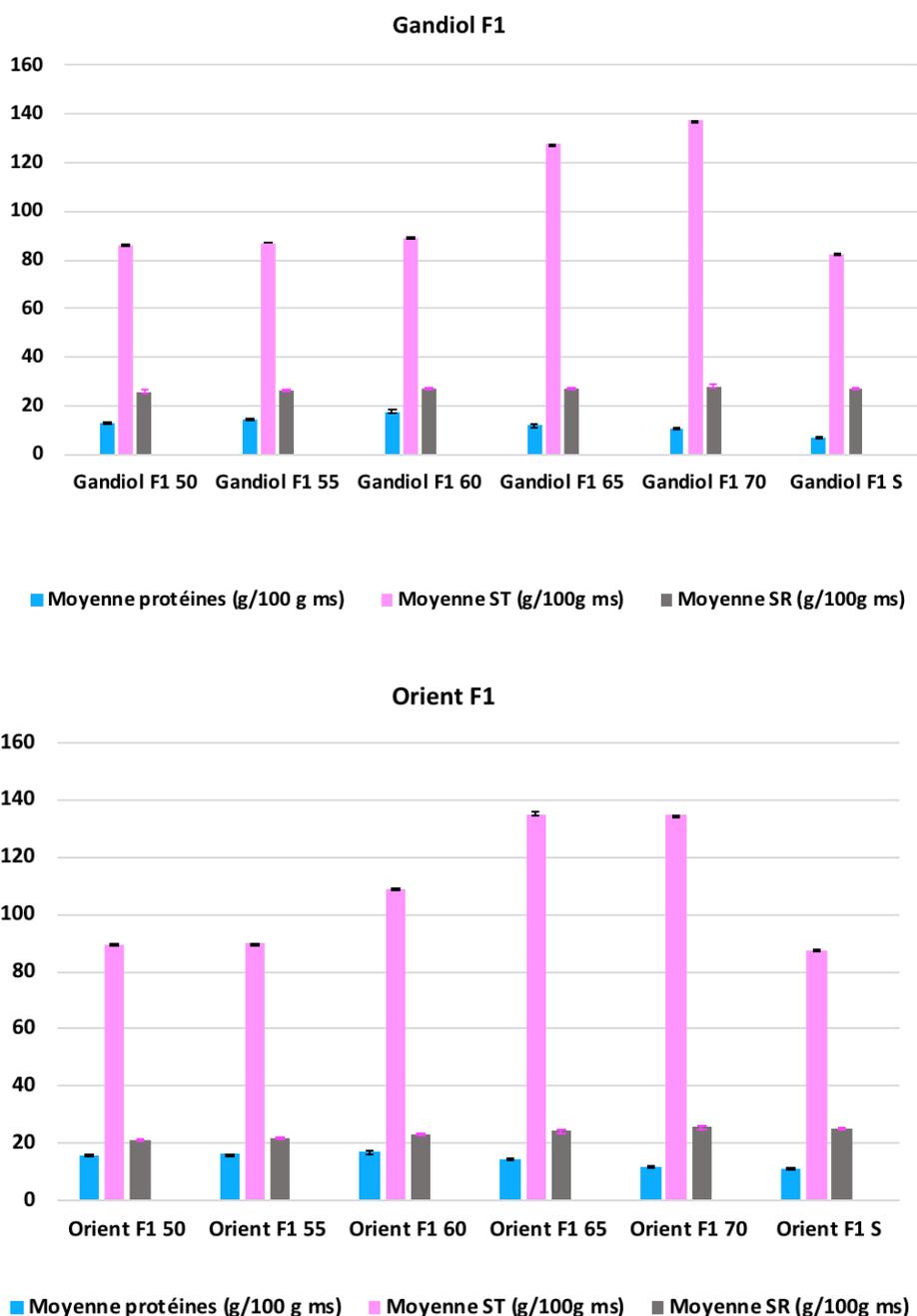


Figure 48 : Teneur en protéines, Sucres Totaux (ST) et Sucres Réducteurs (SR) des poudres d'oignons Gandiol F1 et Orient F1 obtenues dans les conditions optimales de séchage à l'étuve et en serre solaire. (Gandiol F1 S et Orient F1 S correspondent au séchage en serre).

D'après les **Figure 47** et **Figure 48**, aussi bien les teneurs en protéines (entre $10,729 \pm 0,444$ et $21,938 \pm 0,121$ g / 100 g ms), ST (entre $81,993 \pm 0,245$ et $137,351 \pm 0,041$) et SR (entre $21,147 \pm 0,221$ et $28,157 \pm 0,788$) des poudres d'oignon étudiées sont supérieures (facteur multiplicatif de l'ordre de 1,031 à 2,107) aux valeurs de la table de composition des aliments (protéines 10,41 ; ST 79,12 et SR 6,63 g/100 g de portion comestible). Toutefois, quelques échantillons ayant des teneurs inférieures sont observées à savoir la teneur en protéines de la variété Gandiol F1 ($7,242 \pm 0,065$ en serre solaire), les teneurs en ST de la

variété Violet de Galmi ($78,828 \pm 0,155$ à $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ à l'étuve et $78,045 \pm 0,158$ en serre solaire), ainsi que la variété Safari ($78,379 \pm 0,163$ en serre solaire).

II.8.3.2.2 MICRONUTRIMENTS

Les teneurs en polyphénols totaux et les macroéléments (sodium, potassium, magnésium et calcium) analysés sur les poudres des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 sont présentés sur les *Figure 49* et *Figure 50*.

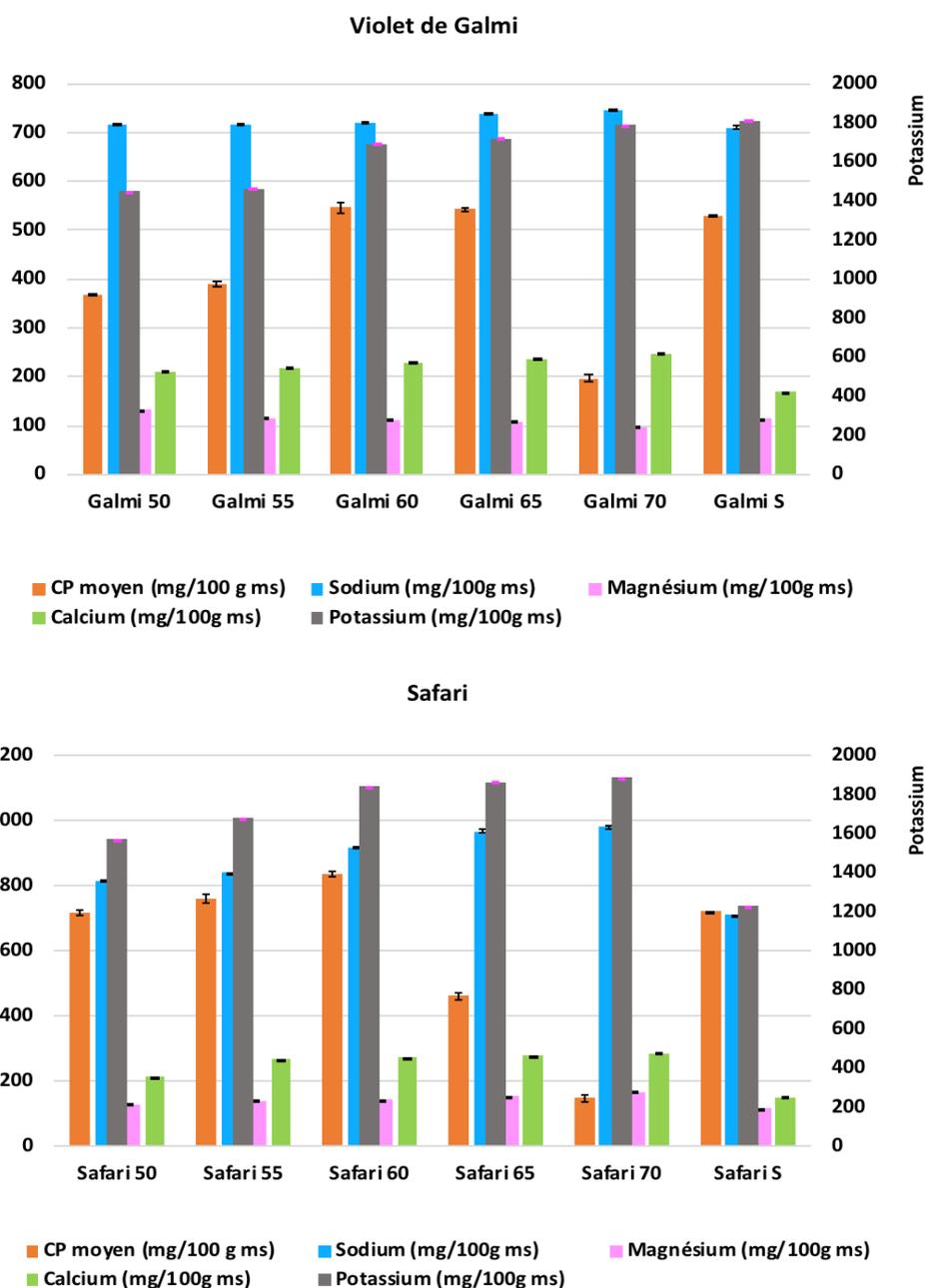


Figure 49 : Teneur en polyphénols et en minéraux (sodium, potassium, magnésium et calcium) des poudres d'oignons Violet de Galmi et Safari obtenues dans les conditions optimales de séchage à l'étuve et en serre solaire.

(Galmi S et Safari S correspondent au séchage en serre, CP : polyphénols).

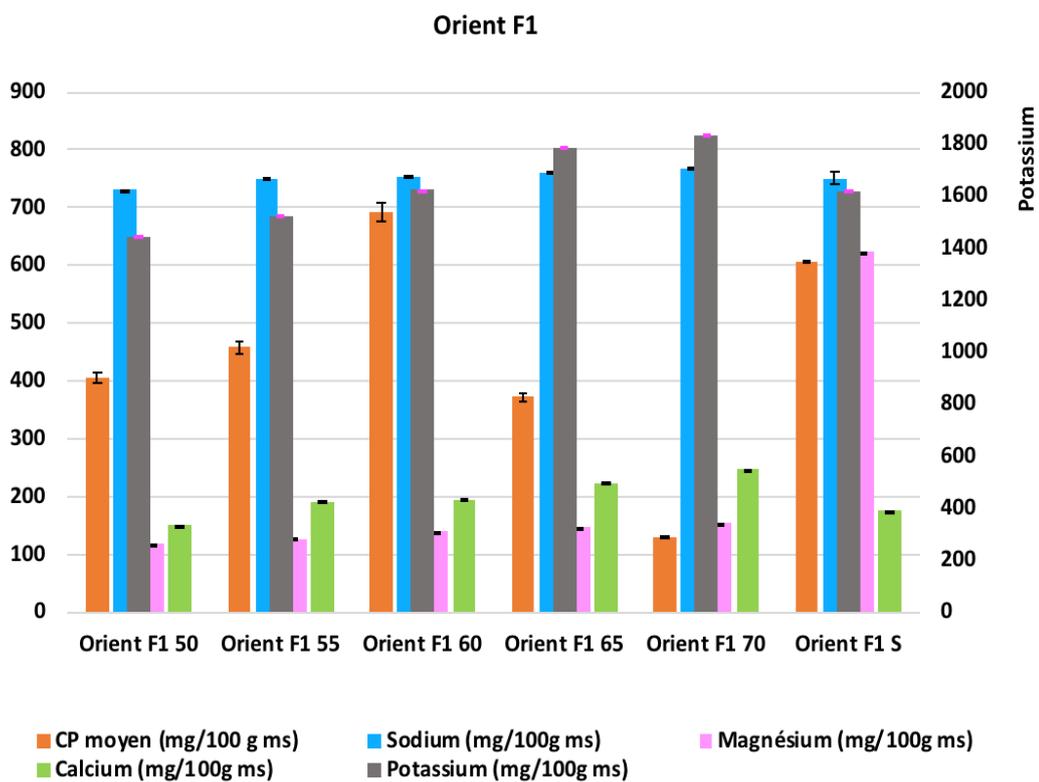
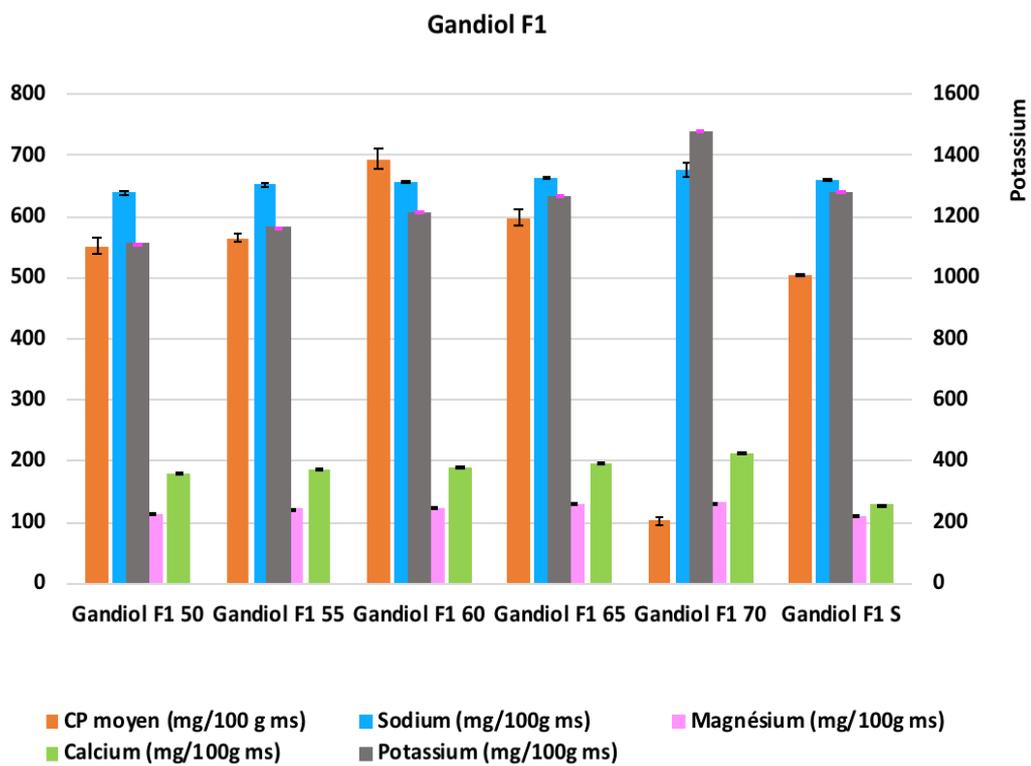


Figure 50 : Teneur en polyphénols et en minéraux (sodium, potassium, magnésium et calcium) des poudres d'oignons Gandiol F1 et Orient F1 obtenues dans les conditions optimales de séchage à l'étuve et en serre solaire.
(Gandiol F1 S et Orient F1 S correspondent au séchage en serre, CP : polyphénols).

⇒ Les Polyphénols

Les teneurs en polyphénols (**Figure 49** et **Figure 50**), augmentent avec la température à l'étuve et commencent à décroître à partir de 65 °C pour l'ensemble des variétés. Quelle que soit la température de séchage à l'étuve, la variété Violet de Galmi dispose de la plus faible teneur en polyphénols, suivie respectivement des variétés Orient F1, Gandiol F1 et Safari. La décroissance observée entre 65 °C et 70 °C est plus marquée (divisée par un facteur de l'ordre de 2,75 à 5,83 selon les variétés) que l'augmentation observée par pas de 5°C entre les températures de 50 °C à 60 °C (multiplié par un facteur de l'ordre de 1,025 à 1,509 selon les variétés).

Ces teneurs en polyphénols des échantillons séchés à l'étuve sont sensiblement identiques à celle des échantillons séchés en serre solaire.

La comparaison de la teneur polyphénols intra-variété et inter-variété pour le séchage à l'étuve, ainsi que la comparaison entre les deux modes de séchage est détaillée au niveau des sous-chapitres **II.5.3.3.1** et **II.5.3.3.2**.

⇒ Les Minéraux

Les macroéléments mesurés (**Figure 49** et **Figure 50**), reflètent que les teneurs en sodium, potassium, magnésium et calcium des quatre variétés augmentent avec la température de séchage à l'étuve exceptée la teneur en magnésium de la variété Violet de Galmi qui décroît (divisé par un facteur compris entre 1,032 et 1,29 par pas de 5°C).

Ces teneurs en sodium, potassium, magnésium et calcium des échantillons séchés à l'étuve sont supérieures à celles obtenues par séchage en serre solaire à l'exception des variétés Violet de Galmi (pour le potassium de 50 °C à 70 °C, le magnésium de 60 °C à 70 °C), Gandiol F1 (pour le sodium de 50 à 60 °C, le potassium de 50 °C à 65 °C) et Orient F1 (pour le sodium et le potassium de 50 °C à 55 °C, le magnésium de 50 °C à 70 °C et le calcium à 50 °C). Toutefois, les différences ne sont pas très prononcées et les variations les plus marquées sont observées avec la variété Safari pour l'ensemble des macroéléments. Quelques exemples de chromatogrammes sont présentés en **Annexe K**.

II.8.4 DISCUSSION

Quel que soit le mode de séchage et les conditions optimales, les teneurs en eau des différentes poudre d'oignon sont toutes au-dessus de la valeur fournie sur la table de composition des aliments (eau 5,59 g/100 g de portion comestible). En raison de l'hygroscopicité des produits, les valeurs de teneur en eau doivent dans certains cas être inférieure à 6 % pour garantir la stabilité [127]. Cette situation n'est satisfaite que par les conditions de séchage à 70 °C des variétés Violet de Galmi et Orient F1 avec respectivement les valeurs d'humidité de $(5,234 \pm 0,350)$ et $(5,023 \pm 0,027)$ à 70 °C.

Néanmoins, les durées de séchage des différentes variétés comprises entre 5h et 8h pour les températures de 50 °C à 65 °C présagent une marge pour abaisser les teneurs en eau en dessous de 6 % en augmentant le temps de séchage si besoin.

Les valeurs de pH des poudres d'oignons comprises entre $5,005 \pm 0,007$ et $5,650 \pm 0,071$ classent ces dernières dans la catégorie des produits alimentaires acides. Ce facteur combiné aux valeurs d'activité de l'eau situées entre $0,338 \pm 0,048$ et $0,675 \pm 0,041$ préservent les poudres d'oignon contre toutes les réactions de dégradations liées au développement des microorganismes [109], [177], [178]. Par ailleurs les valeurs d'activité de l'eau pour les poudres d'oignons des quatre variétés sont toutes inférieures ou égales à la valeur cible de 0,65 spécifiée par l'association européenne des épices [127]. Une exception est relevée avec la poudre d'oignon Gandiol F1 obtenue après séchage en serre solaire qui est très légèrement supérieure ($0,675 \pm 0,041$).

Globalement l'augmentation de la température de séchage entraîne une augmentation des teneurs en protéines, des ST, des SR, des polyphénols et des macroéléments (sodium, potassium, magnésium et calcium). Toutefois, il existe un seuil de température (65 °C à 70 °C selon les variétés et les caractéristiques) à partir de laquelle l'effet inverse est observé [30], [43], [110]–[112].

Par ailleurs, les teneurs importantes en protéine et en SR sont entre autres responsables du changement de couleur des poudres d'oignon observé à partir de 65 °C [179].

En somme, les conditions de séchage à l'étuve (plage de température de 50 °C à 70 °C par pas de 5 °C) et en serre solaire (température variable au cours du séchage de 35 °C à 65 °C garantissent la stabilité par une synergie d'action des trois caractéristiques physico-chimiques que sont la teneur en eau, l'activité de l'eau et le pH des poudres d'oignon.

Les deux modes de séchage entraînent une augmentation aussi bien des caractéristiques physico-chimiques que biochimiques suivies dans le cadre de cette étude. Cet effet bénéfique plus prononcé pour les produits séchés à l'étuve devient délétère à de la température limite de 65 °C ou 70 °C selon les variétés.

II.9 CONCLUSION

Le séchage solaire des variétés d'oignon Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et Orient F1 est tout aussi efficace que le séchage à l'étuve avec des conditions idéales de séchage sensiblement identiques et l'absence de différence significative entre les cinétiques de séchage. Les quatre variétés d'oignon peuvent être mélangés lors du séchage. Cependant, les performances thermiques doivent être basées sur les caractéristiques thermodynamiques de la variété limitante Violet de Galmi. De plus, la comparaison des caractéristiques physico-chimiques et biochimiques avant et après séchage des quatre variétés d'oignon reflètent que globalement leurs

caractéristiques augmentent avec la température de séchage et qu'il existe une température limite à partir de laquelle une décroissance est observée.

Outre, la caractérisation des variétés d'oignon avant et après séchage, les différentes expériences menées dans le cadre de ces travaux de recherches apportent un certain nombre d'éléments de réponses sur les propriétés thermiques et thermodynamiques tels que le coefficient de diffusivité effective, l'énergie d'activation, et la chaleur isotérique. Le meilleur équilibre au niveau du tryptique performances thermiques, caractéristiques initiales et finales des quatre variétés d'oignon, est très déterminant pour la conception des séchoirs solaires et la maîtrise du procédé de séchage garantissant la qualité nutritionnelle, fonctionnelle et organoleptique. Par ailleurs, dans les conditions expérimentales de nos travaux, il s'avère que le séchage en serre solaire est 4 à 3 fois plus économique que le séchage électrique.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La sécurité alimentaire, concept devenu une préoccupation primordiale des populations et des pouvoirs publics, évolue de concert avec le développement durable. En effet, avec la mondialisation marquée par une forte concurrence mais également par les effets de plus en plus délétères de l'action de l'homme sur l'environnement et par une rareté des ressources, toute stratégie d'utilisation des ressources et de développement de nouvelle activité visant à améliorer l'accès à l'alimentation doit préserver les ressources afin de garantir la durabilité des actions.

Dans ce contexte, ces travaux de recherche, insufflés par les difficultés récurrentes auxquelles sont confrontés les acteurs de la sous-filière oignon au Sénégal, sont axés sur la recherche de solutions pour réduire les importantes pertes post-récolte.

L'analyse situationnelle de la sous-filière oignon a fait ressortir plusieurs leviers déterminants tels que la sectorisation des zones de production par période, l'amélioration des conditions de stockage, la transformation et une meilleure organisation du circuit de commercialisation afin de pallier ces pertes post-récolte. Bien que le séchage soit le moyen le plus ancien pour la conservation des aliments, le point le plus névralgique se situe au niveau de la valorisation de la production par séchage du fait de la complexité des phénomènes et de la forte consommation énergétique. A cet effet, le séchage en serre solaire, technique non maîtrisée, pourrait être une solution appropriée compte tenu de la position géographique du Sénégal. Dans cette perspective de recherche d'alternatives prenant en compte les objectifs de sécurité alimentaire et de développement durable, l'optimisation du procédé de séchage à l'étuve et en serre solaire, ainsi que l'étude de l'impact du procédé sur la qualité des oignons, l'objet de cette thèse, apportent ainsi des éléments de réponses aux différentes hypothèses posées.

Concernant les hypothèses, « **Est-ce que le degré de maturité et la variété ont une influence sur le séchage ?** », il ressort de cette étude :

- ❖ qu'au sein d'une même variété les coefficients de diffusivité effective au degré de maturité \leq à 80 % sont supérieurs à ceux au degré de maturité \geq à 85 % à température fixe ;
- ❖ que d'une variété à une autre, à degré de maturité fixe, une différence est observée au niveau des coefficients de diffusivité effective et des valeurs d'énergie d'activation ;
- ❖ d'après les tests statistiques, que seule la variété Violet de Galmi se différencie avec des valeurs de coefficients de diffusivité effective ($2,25 \cdot 10^{-11} \pm 2,28 \cdot 10^{-12}$ et $1,32 \cdot 10^{-10} \pm 1,17 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) et d'énergie d'activation ($58,74 \pm 0,11$ et $66,71 \pm 0,12 \text{ KJ mol}^{-1}$) plus élevées que celles des trois autres sensiblement identiques (coefficient de diffusivité effective

compris entre $1,30 \cdot 10^{-11} \pm 1,24 \cdot 10^{-13}$ et $9,77 \cdot 10^{-11} \pm 1,50 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ et l'énergie d'activation située entre $47,63 \pm 0,29$ et $59,12 \pm 0,13 \text{ KJ mol}^{-1}$;

- ❖ que la chaleur nette isotérique de désorption plus importante pour les faibles teneurs en eau d'équilibre, varie en fonction de la variété (à une teneur d'équilibre de 5 %, les valeurs sont de 156,92 ; 141,37 ; 115,89 et 127,39 KJ mol^{-1} respectivement pour les variétés Violet de Galmi, Safari, Gandiol F1 et orient F1).

Par conséquent, plus le degré de maturité du produit est important, plus l'eau dans le produit est liée, plus le coefficient de diffusivité effective est petit, plus l'énergie d'activation est faible. Du fait de la variation des types de liaisons selon la variété et le stade de désorption, la chaleur nette isotérique de désorption augmente avec la diminution de la teneur en eau.

Quant aux hypothèses, « **Existe-t-il des températures limites inappropriées pour le séchage des quatre variétés d'oignon ?** » et « **Est-ce que le séchage en serre solaire des quatre variétés d'oignon permet de conserver les propriétés nutritionnelles, fonctionnelles et organoleptiques ?** », ces travaux montrent que :

- ❖ quelle que soit la variété et le degré de maturité, les coefficients de diffusivité effective augmentent avec la température ;
- ❖ les températures limites sont celles $\leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$ du fait des temps d'exposition trop longs consommant beaucoup d'énergie, mais altérant également la qualité du produit, et celles $> 65 \text{ }^\circ\text{C}$ car elles entraînent un brunissement des produits et un phénomène de croûtage lié à une élimination trop rapide de l'eau peut apparaître ;
- ❖ les polyphénols, constituants d'intérêt thérapeutique majeurs dans les oignons, augmentent avec la température jusqu'à la température de $65 \text{ }^\circ\text{C}$ où l'effet inverse est observé.

Ainsi, les meilleurs couples températures / temps sont de $55 \text{ à } 65 \text{ }^\circ\text{C} / 6\text{h à } 8\text{h}$ avec un optimum à $60 \text{ }^\circ\text{C}$ à l'étuve et de $8\text{h à } 9\text{h}$ de séchage avec une température dans la serre variant de $35 \text{ à } 65 \text{ }^\circ\text{C}$ dans la journée. De plus, pour une activité de l'eau fixe, chaque augmentation de la température d'un pas de 5°C se traduit par une augmentation de la désorption tandis que pour une teneur en eau d'équilibre fixe, une hausse de l'activité de l'eau avec l'augmentation de la température est observée.

En ce qui concerne l'hypothèse « **Est-ce que le séchage en serre solaire des quatre variétés d'oignon est tout aussi efficace (voire plus efficace) que le séchage à l'étuve et permet d'obtenir une poudre d'oignon stable avec une humidité $\leq 8 \%$?** », il apparaît que :

- ❖ Le test statistique de Student reflète l'absence de différence significative entre les cinétiques de séchage à l'étuve et en serre solaire ;

- ❖ Les valeurs d'humidité et d'activité de l'eau garantissant la stabilité des produits séchés dans ces conditions optimales sont :
 - une activité de l'eau de l'ordre de 0,4 ($0,362 \pm 0,003$ et $0,447 \pm 0,069$) et une teneur en eau respectivement pour les variétés Violet de Galmi, Orient F1, Safari et Gandiol F1 de $7,96 \% \pm 0,42$; $7,17 \% \pm 0,63$; $8,42 \% \pm 0,05$ et $8,67 \% \pm 0,15$ pour le séchage à l'étuve ;
 - une activité de l'eau comprise entre $0,536 \pm 0,005$ et $0,675 \pm 0,041$ et une teneur en eau respectivement pour les variétés Violet de Galmi, Orient F1, Safari et Gandiol F1 de $8,23 \% \pm 2,00$; $6,89 \% \pm 1,05$; $6,88 \% \pm 2,11$ et $8,54 \% \pm 2,62$ pour le séchage en serre solaire.

En somme, le séchage en serre solaire et le séchage électrique permettent d'atteindre des teneurs en eau et des valeurs d'activité de l'eau sensiblement identiques garantissant la stabilité des produits. Les deux modes de séchage ont également un effet bénéfique sur les caractéristiques physico-chimiques et biochimiques suivis.

Au sujet de l'hypothèse « **Est-ce que le séchage en serre solaire des quatre variétés d'oignon permet d'obtenir une bonne productivité ?** », il s'avère que :

- ❖ les capacités en produit humide (0,85 à 0,95 Kg/h m²) et les débits évaporatoires (0,71 et 0,84 Kg/h m²) en serre solaire sont légèrement > à ceux à l'étuve qui sont respectivement de (0,71 à 0,86 Kg/h m²) et (0,61 et 0,73 Kg/h m²);
- ❖ le coût moyen du séchage à l'étuve (148,73 à 145,15 FCFA / Kg H₂O h) est > à celui en serre solaire (54,59 à 91,24 FCFA / Kg H₂O h) selon le nombre de jours d'utilisation de la serre.

La serre permet de sécher des quantités plus importantes à des coûts moins élevés (3 à 4 fois) que le mode de séchage électrique tout en préservant la qualité des produits. En définitive, les meilleurs modèles établis lors de la modélisation des cinétiques de séchage et des isothermes de désorption sont respectivement Verma *et al.* et Henderson. Ces travaux ont permis de décrire les courbes caractéristiques de séchage par des polynômes de degré 3 (facilitant ainsi la prédiction des vitesses de séchage) et de déterminer certaines propriétés thermodynamiques déterminants pour l'amélioration ou la conception optimisée d'un nouvel équipement de séchage et la maîtrise du processus de séchage. Par ailleurs, la variété Violet de Galmi, dont la vitesse de séchage est la plus lente, les coefficients de diffusivité effective, l'énergie d'activation et la chaleur nette isotérique de désorption sont les plus élevés, est la variété limitante pour le séchage simultané des quatre variétés. Ces résultats orientent le choix vers le mode de séchage solaire pour la gestion des pertes post-récolte des oignons. Toutefois des améliorations doivent être apportées.

PERSPECTIVES

En perspectives, il serait intéressant :

- ❖ pour une meilleure optimisation du rendement, d'améliorer le système de ventilation et de métrologie (suivi de la perte de poids, température, humidité relative de façon continue),
- ❖ de déterminer la capacité de réhydratation des poudres pour une éventuelle continuité du séchage la nuit ;
- ❖ d'étudier l'effet de la forme et de la taille des échantillons sur la cinétique de séchage ;
- ❖ de perfectionner l'adéquation du modèle mathématique Verma *et al.* aux données de cinétique de séchage en serre solaire en étudiant la dépendance des paramètres du modèle à l'humidité ;
- ❖ de réduire le temps de séchage en faisant un prétraitement par déshydratation osmotique ;
- ❖ d'étudier la stabilité des produits séchés au cours du stockage ;
- ❖ d'effectuer un contrôle qualité microbiologique afin de s'assurer de la qualité hygiénique du produit fini
- ❖ d'analyser l'impact de la température sur la couleur par colorimétrie et impact de la forte teneur en sucre sur la qualité organoleptique (quels sont les mécanismes de brunissement impliqués dans le changement de couleur) ;
- ❖ pour une éventuelle vulgarisation, de réaliser une analyse sensorielle auprès des consommateurs après reconstitution des oignons séchés ;
- ❖ de valider le progiciel de séchage développé avec les quatre variétés d'oignon, mais aussi avec d'autres fruits et légumes pour une meilleure optimisation des coûts.

Et enfin, la conception d'une serre solaire avec un système de stockage d'énergie à partir de matériaux locaux constitue un levier majeur à explorer pour une réduction efficace des pertes post-récoltes tout en préservant l'environnement.

REFERENCES

- [1] M. Maetz et A.-A. Côté-St-Laurent, « Les ressorts historiques de la sécurité alimentaire », *La faim expliquée*, 2017. [En ligne]. Disponible sur: http://www.lafaimexpliquee.org/La_faim_expliquee/Les_ressorts_historiques.html. [Consulté le: 18-déc-2018].
- [2] UNICEF, « Rapport annuel de l'UNICEF 2011 », United Nations International Children's Fund (UNICEF), 2011.
- [3] PAM, « Analyse Globale de la Vulnérabilité, de la Sécurité Alimentaire et de la Nutrition (AGVSAN) », Programme Alimentaire Mondiale (PAM), 2014.
- [4] P. Janin, « La vulnérabilité alimentaire des Sahéliens : concepts, échelles et enseignements d'une recherche de terrain », *Espace Géographique*, vol. 35, n° 4, p. 355, 2006.
- [5] C. Aubertin et F.-D. Vivien, *le développement durable : Enjeux politiques, économiques et sociaux*. La documentation Française, 2010.
- [6] M. Maetz, « Qu'est-ce que la sécurité alimentaire? », *La faim expliquée*, 2018. [En ligne]. Disponible sur: http://lafaimexpliquee.org/La_faim_expliquee/La_securite_alimentaire.html.
- [7] M. Ndiaye, « Indicateurs de la sécurité alimentaire », p. 27, 2014.
- [8] N. Sirven, « De la pauvreté à la vulnérabilité : évolutions conceptuelles et méthodologiques », *Mondes En Dev.*, vol. n° 140, n° 4, p. 9-24, déc. 2007.
- [9] C. Deluzarche, « Gaspillage alimentaire : en 2030, 66 tonnes de nourriture seront jetées chaque seconde », *Futura Sciences*, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/developpement-durable-gaspillage-alimentaire-2030-66-tonnes-nourriture-seront-jetees-chaque-seconde-72507/>. [Consulté le: 17-déc-2018].
- [10] ANSD, « Bulletin Mensuel Situation Economique », Agence Nationale de Statistique et de la Démographie, Bulletin mensuel, 2016.
- [11] DH, « Direction de l'Horticulture (DH) : statistiques horticoles », Direction de l'Horticulture, 2015.
- [12] ANSD, « Agence Nationale de Statistiques et de la Démographie (ANSN) : Situation Economique et Sociale du Sénégal (SES) », http://www.ansd.sn/index.php?option=com_sess&view=sess&Itemid=418, 2014. [En ligne]. Disponible sur: http://www.ansd.sn/index.php?option=com_sess&view=sess&Itemid=418. [Consulté le: 02-mars-2018].
- [13] ARM, « Agence de Régulation des Marchés (ARM): Rôles et Impacts des actions de

- l'Agence de Régulation des Marchés dans l'organisation de la sous-filière oignon au Sénégal », Agence de Régulation des Marchés, 2016.
- [14] CIQUAL, « Ciqual Table de composition nutritionnelle des aliments », <https://ciqual.anses.fr/>, 2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://ciqual.anses.fr/>. [Consulté le: 02-mars-2018].
- [15] N. Albitar, S. Mounir, C. Besombes, et K. Allaf, « Improving the drying of onion using the instant controlled pressure drop technology », *Dry. Technol.*, vol. 29, n° 9, p. 993-1001, juill. 2011.
- [16] M. K. Krokida, V. T. Karathanos, Z. B. Maroulis, et D. Marinos-Kouris, « Drying kinetics of some vegetables », *J. Food Eng.*, vol. 59, n° 4, p. 391–403, 2003.
- [17] R. Jeantet, T. Croguennec, P. Schuck, et G. Brulé, *Sciences des Aliments 1- Stabilisation biologique et physico-chimique*. Lavoisier - Tec & Doc, 2008.
- [18] C. Bonazzi, E. Dumoulin, et J. J. Bimbenet, « Le séchage des produits alimentaires », *Ind. Aliment. Agric.*, vol. 125, n° 03-04, p. 12–22, 2008.
- [19] S. J. Babalis et V. G. Belessiotis, « Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs », *J. Food Eng.*, vol. 65, n° 3, p. 449–458, 2004.
- [20] FAOSTAT, « Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database (FAOSTAT) », <http://www.fao.org/faostat/fr/#country/195>, 2016. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.fao.org/faostat/fr/#country/195>. [Consulté le: 02-mars-2018].
- [21] R. Abdou, Y. Bakasso, T. Adam, M. Saadou, et J.-P. Baudoin, « Biologie, diversité et outils pour l'analyse de la diversité génétique de l'oignon, *Allium cepa* L.(synthèse bibliographique) », *Biotechnol. Agron. Société Environ.*, vol. 19, n° 2, p. 184–196, 2015.
- [22] D. Gourc, D. Monnier, et J. D. Payet, « Oignon guide pratique, Ile de la réunion, France », *Fiche Tech. Www Armefflor Fr*, p. 1-61, 2007.
- [23] R. Kroll, « Les cultures maraîchères », Editions Maisonneuve et Larose : Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale (C.T.A.), Agence de coopération culturelle et technique. Paris, 1994, p. 219.
- [24] G. Griffiths, L. Trueman, T. Crowther, B. Thomas, et B. Smith, « Onions : A global benefit to health », *Phytother. Res.*, vol. 16, n° 7, p. 603-615, nov. 2002.
- [25] M. M. Lokke, M. Edelenbos, E. Larsen, et A. Feilberg, « Investigation of volatiles emitted from freshly cut onions (*Allium cepa* L.) by real time Proton-Transfer Reaction-Mass Spectrometry (PTR-MS) », *Sensors*, vol. 12, n° 12, p. 16060-16076, nov. 2012.
- [26] J. Auger, C. Lecomte, et E. Thibout, « Les composés soufrés des *Allium*: leurs activités biologiques chez les insectes et leur production », *Acta Bot. Gallica*, vol. 140, n° 2, p.

- 157-168, janv. 1993.
- [27] R. Anton, « Les constituants spécifiques des Alliaceae », *Phytothérapie*, vol. 14, n° 3, p. 149-153, juin 2016.
- [28] J. Bruneton, *Pharmacognosie, phytochimie, plantes médicinales (4e ed.)*. Lavoisier, 2009.
- [29] A. R. S. USDA, « USDA national nutrient database for standard reference », 2013.
- [30] J. Yang, K. J. Meyers, J. van der Heide, et R. H. Liu, « Varietal differences in phenolic content and antioxidant and antiproliferative activities of onions », *J. Agric. Food Chem.*, vol. 52, n° 22, p. 6787-6793, nov. 2004.
- [31] B. Rodríguez Galdón, E. M. Rodríguez Rodríguez, et C. Díaz Romero, « Flavonoids in onion cultivars (*Allium cepa* L.) », *J. Food Sci.*, vol. 73, n° 8, p. C599-C605, oct. 2008.
- [32] V. Lanzotti, « The analysis of onion and garlic », *J. Chromatogr. A*, vol. 1112, n° 1-2, p. 3-22, avr. 2006.
- [33] P. Rose, M. Whiteman, P. K. Moore, et Y. Z. Zhu, « Bioactive S-alk(en)yl cysteine sulfoxide metabolites in the genus *Allium*: the chemistry of potential therapeutic agents », *Nat. Prod. Rep.*, vol. 22, n° 3, p. 351-368, juin 2005.
- [34] W. H. Briggs, J. D. Folts, H. E. Osman, et I. L. Goldman, « Administration of raw onion inhibits platelet-mediated thrombosis in dogs », *J. Nutr.*, vol. 131, n° 10, p. 2619-2622, oct. 2001.
- [35] G. P. Hubbard, S. Wolfram, R. de Vos, A. Bovy, J. M. Gibbins, et J. A. Lovegrove, « Ingestion of onion soup high in quercetin inhibits platelet aggregation and essential components of the collagen-stimulated platelet activation pathway in man: a pilot study », *Br. J. Nutr.*, vol. 96, n° 3, p. 482-488, sept. 2006.
- [36] K. Janssen *et al.*, « Effects of the flavonoids quercetin and apigenin on hemostasis in healthy volunteers: results from an in vitro and a dietary supplement study », *Am. J. Clin. Nutr.*, vol. 67, n° 2, p. 255-262, févr. 1998.
- [37] M. Aviram, M. Kaplan, M. Rosenblat, et B. Fuhrman, « Dietary antioxidants and paraoxonases against LDL oxidation and atherosclerosis development », in *Atherosclerosis: Diet and Drugs*, A. von Eckardstein, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005, p. 263-300.
- [38] M.-Y. Shon, S.-D. Choi, G.-G. Kahng, S.-H. Nam, et N.-J. Sung, « Antimutagenic, antioxidant and free radical scavenging activity of ethyl acetate extracts from white, yellow and red onions », *Food Chem. Toxicol.*, vol. 42, n° 4, p. 659-666, avr. 2004.
- [39] J. K. Willcox, S. L. Ash, et G. L. Catignani, « Antioxidants and prevention of chronic disease », *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, vol. 44, n° 4, p. 275-295, juill. 2004.
- [40] C. Galeone *et al.*, « Onion and garlic use and human cancer », p. 6, 2018.

- [41] M. Ali, T. Bordia, et T. Mustafa, « Effect of raw versus boiled aqueous extract of garlic and onion on platelet aggregation », *Prostaglandins Leukot. Essent. Fat. Acids PLEFA*, vol. 60, n° 1, p. 43-47, janv. 1999.
- [42] M. Ali, M. Thomson, et M. Afzal, « Garlic and onions: their effect on eicosanoid metabolism and its clinical relevance », *Prostaglandins Leukot. Essent. Fat. Acids PLEFA*, vol. 62, n° 2, p. 55-73, févr. 2000.
- [43] K. Lombard, E. Peffley, E. Geoffriau, L. Thompson, et A. Herring, « Quercetin in onion (*Allium cepa* L.) after heat-treatment simulating home preparation », *J. Food Compos. Anal.*, vol. 18, n° 6, p. 571-581, sept. 2005.
- [44] S. D'Alessandro et A. Soumah, « Évaluation sous régionale de la chaîne de valeurs oignon/échalote en Afrique de l'Ouest », *Bethesda MD Proj. ATP Abt Assoc. Inc*, p. 3-72, 2008.
- [45] ANSD, « Agence Nationale de Statistique et de la Démographie (ANSD) : RGPHAE-2013, Résultats définitifs », <http://www.ansd.sn/ressources/RGPHAE-2013/ressources/pages/rapports-regionaux.htm>, 2013. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.ansd.sn/ressources/RGPHAE-2013/ressources/pages/rapports-regionaux.htm>. [Consulté le: 02-mars-2018].
- [46] C. L. Luumpa, R. N. Kouassi, et O. J. M. Chinganya, « Annuaire statistique pour l'Afrique. », Banque Africaine de Développement (BAD), Commission de l'Union Africaine (CUA) et la Commission Économique des Nations Unies pour l'Afrique (CEA), 2016.
- [47] F. J. Cabral, « Politique commerciale, croissance et réduction de la pauvreté dans les Pays les Moins Avancées : le cas du Sénégal. », Ministère du Commerce, Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement, 2012.
- [48] P. A. Seck, « Programme d'Accélération de la Cadence de l'Agriculture Sénégalaise (PRACAS). », Ministre de l'Agriculture et de l'Équipement Rural du Sénégal, 2013.
- [49] O. David et P. Moustier, « Formation de la qualité dans la filière oignon en Afrique de l'Ouest », *Bull. Liaison Coop. Régionale Pour Dév. Prod. Hortic. En Afr.*, n° 12, p. 55-65, 1997.
- [50] N. F. Beye, N. Ayessou, M. Diop, N. Saliou, et C. G. Mar, « Determinants of onion self-sufficiency in Senegal: situational analysis of the subsector. », *Int. J. Adv. Res.*, vol. 7, n°6, p. 560-572, juin 2019.
- [51] J.-P. Duroudier, *Adsorption – séchage des solides divisés*. ISTE Editions, 2016.
- [52] T. H. Nguyen, « Étude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux », p. 243, 2015.

- [53] W. K. Lewis, « The rate of drying of solid materials. », *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 13, n° 5, p. 427-432, mai 1921.
- [54] L. Remarche et A. Belhamri, « Modélisation du séchage par convection », *Rev. Energ. Renouvelables CISM*, vol. 8, p. 285–297, 2008.
- [55] T. K. Sherwood, « The Drying of Solids—I », *Ind. Eng. Chem.*, vol. 21, n° 1, p. 12-16, janv. 1929.
- [56] A. Tom, « Contribution au séchage solaire des produits carnés : Modélisation et réalisation d'un séchoir adapté aux pays tropicaux. », PhD Thesis, Paris, ENSAM, 2015.
- [57] L. Bennamoun et A. Belhamri, « Design and simulation of a solar dryer for agriculture products », *J. Food Eng.*, vol. 59, n° 2-3, p. 259-266, sept. 2003.
- [58] C. Ahouannou, Y. Jannot, B. Lips, et A. Lallemand, « Caractérisation et modélisation du séchage de trois produits tropicaux: manioc, gingembre et gombo », *Sci. Aliments*, vol. 20, n° 4/5, p. 413–432, 2000.
- [59] S. Chemkhi, « Séchage d'un milieu déformable non saturé: modélisation du couplage hygromécanique », PhD Thesis, Université Bordeaux 1, 2008.
- [60] M. A. Haddad, « Contribution théorique et modélisation des phénomènes instantanés dans les opérations d'autovaporisation et de déshydratation », p. 260, 2007.
- [61] H. B. Aissia, S. B. Nasrallah, et L. Gharbi, « Etude numérique des transferts bidimensionnels de chaleur et de masse lors du séchage convectif des matériaux de construction », *Journ. Int. Therm. JITH*, p. 512–518, 1993.
- [62] A. Belghit, M. Belahmidi, A. Bennis, B. C. Boutaleb, et S. Benet, « Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée », *Rev. Générale Therm.*, vol. 36, n° 11, p. 837–850, 1997.
- [63] M. Kouhila, A. Belghit, et A. Bennis, « Modélisation numérique des transferts thermiques et massiques lors du séchage convectif du liège », *Rev. Énerg. Renouvelables*, vol. 3, n° 2, p. 105–115, 2000.
- [64] A. Boussalia, « Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux », 2010.
- [65] S. Manaa, « Analyse structurelle et conceptuelle des facteurs d'optimisation des performances des insulateurs plans munis d'ailettes pour des applications diverses en fonction des contextes géographiques et climatiques », PhD Thesis, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [66] B. Touati, « Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (*Mentha viridis*) », PhD Thesis, Villeurbanne, INSA, 2008.
- [67] R. Karoui, « Le Séchage: Caractéristiques techniques et applications des principaux types

- de séchoirs en industrie agro-alimentaire », 2015. [En ligne]. Disponible sur: <http://tech-alim.univ-lille1.fr/sechage/co/Chapitre3.html>. [Consulté le: 10-mai-2018].
- [68] Y. Jannot, « Habilitation à diriger des recherches: Du séchage des produits alimentaires tropicaux à la caractérisation thermophysique des solides », Université de Bordeaux I, 2006.
- [69] L. Mendez Lagunas, « L'effet des conditions variables de séchage sur la cinétique de séchage et la qualité de l'ail », PhD Thesis, Université de Laval, Québec, 2007.
- [70] B. K. May et P. Perré, « The importance of considering exchange surface area reduction to exhibit a constant drying flux period in foodstuffs », *J. Food Eng.*, vol. 54, n° 4, p. 271-282, oct. 2002.
- [71] S. Boughali, « Etude et optimisation du séchage solaire des Produits agro-alimentaires dans les zones Arides et désertiques », PhD Thesis, Université de Batna 2, 2010.
- [72] K. Allaf, S. Mounir, et T. Allaf, « Swell-drying: séchage et texturation par DIC des végétaux », 2012.
- [73] S. B. Amara, « Ecoulements et transferts thermiques en convection naturelle dans les milieux macro-poreux alimentaires application aux réfrigérateurs menagers », p. 279, 2005.
- [74] J. Huetz, « Notions de transfert thermique par convection », p. 47, 1990.
- [75] P. Marty, « Transferts thermiques convectifs », p. 30, 2013.
- [76] D. Mennouche, « Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes médicinales par les procédés de séchage solaire », PhD Thesis, 2006.
- [77] ADEME, « Les procédés de séchage dans l'industrie », Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). CETIAT, 2017.
- [78] C. Hrubesch, « Les énergies renouvelables: les bases, la technologie, et le potentiel au Sénégal », *Dakar Senegal GIZ-Peracod*, 2011.
- [79] ANACIM, « Evolution du flux solaire et de l'ensoleillement sur les dix dernières années au Sénégal », Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie, 2017.
- [80] O. Aumporn, *Contribution à l'étude des performances d'un séchoir serre avec stockage de chaleur dans des matériaux à changement de phase*. Perpignan, 2017.
- [81] A. Sharma, C. R. Chen, et N. Vu Lan, « Solar-energy drying systems: A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, n° 6-7, p. 1185-1210, août 2009.
- [82] T. T. E. Boroze, « Outil d'aide à la conception de séchoirs pour les produits agricoles tropicaux », 2011.
- [83] K. Khadija, « Expérimentation et modélisation du comportement énergétique et thermique d'un séchoir solaire sous le climat de la région de Rabat », 2014.
- [84] S. Bechis, « Manuel de construction et utilisation du séchoir Icaro », p. 63, 2007.

- [85] N. Berthomieu, « Promotion de l'Electrification Rurale et de l'Approvisionnement Durable en Combustibles Domestiques PERACOD : Fiche sur les différents types de séchoirs solaires a convection naturelle et forcee », Ministère de l'Energie et des Mines du Sénégal. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GTZ (GmbH)., 2004.
- [86] A. A. El-Sebaili, S. Aboul-Enein, M. R. I. Ramadan, et H. G. El-Gohary, « Empirical correlations for drying kinetics of some fruits and vegetables », *Energy*, vol. 27, n° 9, p. 845-859, sept. 2002.
- [87] T. Lhendup, « Technical and financial feasibility of a solar dryer in Bhutan », *Energy Sustain. Dev.*, vol. 9, n° 4, p. 17-24, déc. 2005.
- [88] N. Allanic, « Optimisation sous contraintes d'une opération de séchage combinant la convection et les technologies rayonnantes infrarouges-application a un polymère en solution aqueuse », PhD Thesis, Université de Bretagne Sud, 2006.
- [89] F. Roman et O. Hensel, « Effect of air temperature and relative humidity on the thin-layer drying of celery leaves (*Apium graveolens* var. *secalinum*) », *Agric. Eng. Int. CIGR J.*, vol. 13, n° 2, 2011.
- [90] I. Zlatanović, M. Komatina, et D. Antonijević, « Low-temperature convective drying of apple cubes », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 53, n° 1, p. 114–123, 2013.
- [91] C. T. Kiranoudis, Z. B. Maroulis, et D. Marinou-Kouris, « Drying kinetics of onion and green pepper », *Dry. Technol.*, vol. 10, n° 4, p. 995-1011, sept. 1992.
- [92] L. Hassini, K. Smida, S. Azzouz, et A. Belghith, « Experimental study of drying behaviour of an agricultural product », in *Drying 2002: Proceedings of the 13th International Drying Symposium (IDS'2002)*, 2002, p. 1457–1463.
- [93] L. M. Vaccarezza, J. L. Lombardi, et J. Chirife, « Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root », *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 9, n° 3, p. 317–327, 1974.
- [94] C. T. Kiranoudis, E. Tsami, et Z. B. Maroulis, « Microwave vacuum drying kinetics of some fruits », *Dry. Technol.*, vol. 15, n° 10, p. 2421-2440, nov. 1997.
- [95] P. N. Sarsavadia, R. L. Sawhney, D. R. Pangavhane, et S. P. Singh, « Drying behaviour of brined onion slices », *J. Food Eng.*, vol. 40, n° 3, p. 219–226, 1999.
- [96] I. Doymaz, « Convective air drying characteristics of thin layer carrots », *J. Food Eng.*, vol. 61, n° 3, p. 359–364, 2004.
- [97] T. J. Mitchell et C. S. Potts, « Through-circulation drying of vegetable materials. III.—carrots », *J. Sci. Food Agric.*, vol. 9, n° 2, p. 93–98, 1958.
- [98] G. Clemente, A. Frías, N. Sanjuan, J. Benedito, et A. Mulet, « Influence of air velocity in dehydration of potato cubes », in *III European Drying Conference (EuroDrying'2011)*, 2011, p. 26–28.

- [99] L. E. Kurozawa, I. Terng, M. D. Hubinger, et K. J. Park, « Ascorbic acid degradation of papaya during drying: Effect of process conditions and glass transition phenomenon », *J. Food Eng.*, vol. 123, p. 157-164, févr. 2014.
- [100] M. A. Karim et M. N. A. Hawlader, « Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 48, n° 23-24, p. 4914–4925, 2005.
- [101] A. Vega-Gálvez *et al.*, « Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices », *Food Chem.*, vol. 132, n° 1, p. 51-59, mai 2012.
- [102] H. B. Abdelkader, « Étude de l'impact des méthodes de séchage sur la qualité nutritionnelle et physico-chimique des poudres de fromage gouda », PhD Thesis, Université de Laval, 2011.
- [103] K. Abdullah, D. Wulandani, L. O. Nelwan, et L. P. Manalu, « Recent development of GHE solar drying in Indonesia », *Dry. Technol.*, vol. 19, n° 2, p. 245–256, 2001.
- [104] O. V. Ekechukwu et B. Norton, « Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology », *Energy Convers.*, p. 41, 1999.
- [105] S. VijayaVenkataRaman, S. Iniyar, et R. Goic, « A review of solar drying technologies », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, n° 5, p. 2652-2670, juin 2012.
- [106] P. Gbaha, H. Yobouet Andoh, J. Kouassi Saraka, B. Kaménan Koua, et S. Touré, « Experimental investigation of a solar dryer with natural convective heat flow », *Renew. Energy*, vol. 32, n° 11, p. 1817-1829, sept. 2007.
- [107] P. S. Chauhan et A. Kumar, « Thermal modeling and drying kinetics of gooseberry drying inside north wall insulated greenhouse dryer », *Appl. Therm. Eng.*, vol. 130, p. 587-597, févr. 2018.
- [108] M. Konate, C. Parkouda, V. Tarpaga, F. Guira, A. Rouamba, et H. Sawadogo–Lingani, « Evaluation des potentialités nutritives et l'aptitude à la conservation de onze variétés d'oignon (*Allium cepa* L.) bulbe introduites au Burkina Faso », *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 11, n° 5, p. 2005–2015, 2017.
- [109] A. Musavu-Ndob, « Mesures, modélisation, prédiction des propriétés physico-chimiques dans les aliments à l'aide d'un modèle thermodynamique: application aux produits carnés et aux produits laitiers », PhD Thesis, 2016.
- [110] A. Mokrani, « Etude comparative du pouvoir antioxydant de quelques alliacées », Mémoire Magister, Université Abderahmane Mira Bejaia, Algérie, 2009.
- [111] S. Nafir-Zenati, G. Gallon, J.-C. Favier, et Journées Internationales du GERM, 5., Balaruc (FRA), 1992/11/22-28, « Effet de la cuisson sur la teneur en minéraux des épinards »,

ORSTOM, Montpellier, 1992.

- [112] S. Vodouhe, A. Dovoedo, V. B. Anihouvi, et R. C. Tossou, « Influence du mode de cuisson sur la valeur nutritionnelle de *Solanum macrocarpum*, *Amaranthus hybridus* et *Ocimum gratissimum*, trois légumes-feuilles traditionnels acclimatés au Bénin », *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 6, n° 5, p. 1926-1937-1937, janv. 2012.
- [113] Í. Doymaz, « Evaluation of mathematical models for prediction of thin-layer drying of banana slices », *Int. J. Food Prop.*, vol. 13, n° 3, p. 486-497, avr. 2010.
- [114] M. S. Brooks, N. A. El-Hana, et A. E. Ghaly, « Effects of tomato geometries and air temperature on the drying behavior of plum tomato », *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 5, n° 10, p. 1369–1375, 2008.
- [115] P. S. Madamba, R. H. Driscoll, et K. A. Buckle, « The thin-layer drying characteristics of garlic slices », *J. Food Eng.*, vol. 29, n° 1, p. 75–97, 1996.
- [116] G. Mazza et M. Lemaguer, « Dehydration of onion: some theoretical and practical considerations », *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 15, n° 2, p. 181-194, 1980.
- [117] B. A. Souraki, A. Ghaffari, et Y. Bayat, « Mathematical modeling of moisture and solute diffusion in the cylindrical green bean during osmotic dehydration in salt solution », *Food Bioprod. Process.*, vol. 90, n° 1, p. 64–71, 2012.
- [118] O. Corzo, N. Bracho, et C. Alvarez, « Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity stages during air drying », *J. Food Eng.*, vol. 87, n° 4, p. 479–484, 2008.
- [119] Í. Doymaz, « Drying characteristics and kinetics of okra », *J. Food Eng.*, vol. 69, n° 3, p. 275–279, 2005.
- [120] I. Doymaz et M. Pala, « The thin-layer drying characteristics of corn », *J. Food Eng.*, vol. 60, n° 2, p. 125–130, 2003.
- [121] V. Guillard, B. Broyart, C. Bonazzi, S. Guilbert, et N. Gontard, « Modelling of moisture transfer in a composite food: dynamic water properties in an intermediate aw porous product in contact with high aw filling », *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 81, n° 9, p. 1090-1098, oct. 2003.
- [122] O. K. Honoré, Z. François, S. Raguilignaba, T. Aboubacar, et D. Hélène, « Characterization of okra convective drying, influence of maturity », *Food Nutr. Sci.*, vol. 5, n° 06, p. 590, 2014.
- [123] D. Ndapeu, E. Njeugna, S. B. Bistac, J. Y. Drean, M. Fogue, et J. N. Foba, « Experimental Study of the Drying Kinetics of the Coconut Shells (*Nucifera*) of Cameroon », *Mater. Sci. Appl.*, vol. 04, n° 12, p. 822-830, 2013.
- [124] M.-H. Nguyen et W. E. Price, « Air-drying of banana: influence of experimental

- parameters, slab thickness, banana maturity and harvesting season », *J. Food Eng.*, vol. 79, n° 1, p. 200–207, 2007.
- [125] B. Nourhène, K. Mohammed, et K. Nabil, « Experimental and mathematical investigations of convective solar drying of four varieties of olive leaves », *Food Bioprod. Process.*, vol. 86, n° 3, p. 176–184, 2008.
- [126] A. Benhamou, A. Idlimam, A. Lamharrar, B. Benyoucef, et M. Kouhila, « Diffusivité hydrique et cinétique de séchage solaire en convection forcée des feuilles de marjolaine », *Rev. Energ. Renouvelables*, vol. 11, n° 1, p. 75–85, 2008.
- [127] ESA, « European Spice Association (ESA) quality minima document », *Bonn Ger.*, 2004.
- [128] M. Faiveley, « L'eau et la conservation des aliments », *Tech. L'Ingénieur F*, vol. 1011, n° V2, 2012.
- [129] M. Le Meste, D. Simatos, et D. Lorient, *L'eau dans les aliments: aspects fondamentaux: signification dans les propriétés sensorielles des aliments et dans la conduite des procédés*. Éditions TEC & DOC, 2002.
- [130] I. Lawrence et K. Lin, « A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility », *Biometrics*, p. 255–268, 1989.
- [131] A. Bernard et H. Carlier, *Aspects nutritionnels des constituants des aliments. Influences des technologies*. Lavoisier - Tec & Doc, 1992.
- [132] M. Faiveley, « L'eau et la conservation des aliments. Notions de biochimie alimentaire et alimentation humaine », *Tech. L'Ingénieur F*, vol. 1011, 2003.
- [133] M. Le Meste et E. Chiotelli, « Chapitre 2. Interactions entre l'eau et les autres constituants alimentaires-Rôle dans la conformation, l'état d'association, la stabilité et la fonctionnalité des molécules », in *L'eau dans les aliments (Le Meste, M., Lorient, D. & Simatos, D., eds.)*. Tec & Doc Lavoisier, Paris, Lavoisier - Tec & Doc, 2002.
- [134] A. Charreau et R. Cavaille, « Séchage: I. Théorie et calculs », *Tech. Ing. Génie Procédés*, vol. 2, p. J24080–1, 1991.
- [135] N. Jiménez Elizondo, « Impact des opérations thermiques agroalimentaires à hautes températures sur la dégradation des anthocyanes: Caractérisation et modélisation des cinétiques réactionnelles », Montpellier SUPAGRO - Institut des Régions Chaudes, 2011.
- [136] A.-N. Zohri, K. Abdel-Gawad, et S. Saber, « Antibacterial, antidermatophytic and antitoxigenic activities of onion (*Allium cepa* L.) oil », *Microbiol. Res.*, vol. 150, n° 2, p. 167-172, mai 1995.
- [137] N. H. Ceaglske et O. A. Hougen, « Drying Granular Solids », *Ind. Eng. Chem.*, vol. 29, n° 7, p. 805-813, juill. 1937.
- [138] J. R. Philip et D. A. De Vries, « Moisture movement in porous materials under temperature

- gradients », *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 38, n° 2, p. 222, 1957.
- [139] S. Whitaker, « Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: a theory of drying », in *Advances in heat transfer*, vol. 13, Elsevier, 1977, p. 119–203.
- [140] F. Erdoğdu, « Mathematical modeling of transport phenomena for simulation and optimization of food processing operations », in *Advances in Food Process Engineering Research and Applications*, S. Yanniotis, P. Taoukis, N. G. Stoforos, et V. T. Karathanos, Éd. Boston, MA: Springer US, 2013, p. 473-487.
- [141] A. S. Mujumdar, *Handbook of industrial drying*. CRC press, 2014.
- [142] B. Soulier, *Sur la modélisation expérimentale en mécanique : précision, optimisation et applications industrielles*. Cachan, Ecole normale supérieure, 1994.
- [143] O. Prakash et A. Kumar, « Environomical analysis and mathematical modelling for tomato flakes drying in a modified greenhouse dryer under active mode », *Int. J. Food Eng.*, vol. 10, n° 4, janv. 2014.
- [144] N. F. Beye, C. Kane, N. C. Ayessou, C. Talla, A. Sene, et C. M. Diop, « Influence of variety and maturity level on natural convective heat drying of four onion varieties grown in Senegal », *Food Nutr. Sci.*, vol. 09, p. 997, août 2018.
- [145] S. M. Hendreson et S. Pabis, « Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficients », *J. Agric. Eng. Res.*, vol. 6, p. 169–174, 1961.
- [146] A. Midilli, H. Kucuk, et Z. Yapar, « A new model for single-layer drying », *Dry. Technol.*, vol. 20, n° 7, p. 1503–1513, 2002.
- [147] G. E. Page, « Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin layers. », 1949.
- [148] Q. (University of I. Zhang, X. Q. Gui, et J. B. Litchfield, « A prototype fuzzy expert system for corn quality control during drying processess », *Pap. - Am. Soc. Agric. Eng. USA*, 1989.
- [149] L. M. Diamante et P. A. Munro, « Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices », *Sol. Energy*, vol. 51, n° 4, p. 271-276, oct. 1993.
- [150] A. Yagcioglu, « Drying characteristic of laurel leaves under different conditions », in *Proceedings of the 7th International congress on agricultural mechanization and energy, 1999*, 1999, p. 565–569.
- [151] İ. T. Toğrul et D. Pehlivan, « Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process », *J. Food Eng.*, vol. 65, n° 3, p. 413–425, 2004.
- [152] O. Yaldız et C. Ertekyn, « Thin layer solar drying of some vegetables », *Dry. Technol.*, vol. 19, n° 3-4, p. 583-597, mars 2001.
- [153] L. R. Verma, R. A. Bucklin, J. B. Endan, et F. T. Wratten, « Effects of drying air parameters on rice drying models », *Trans. ASAE*, vol. 28, n° 1, p. 296-301, 1985.

- [154] D. A. Van Meel, « Adiabatic convection batch drying with recirculation of air », *Chem. Eng. Sci.*, vol. 9, n° 1, p. 36–44, 1958.
- [155] N. F. Beye *et al.*, « Study of four onion varieties drying kinetics in an oven and a solar greenhouse », *J. Food Res.*, vol. 8, n° 3, p. p59, avr. 2019.
- [156] E. Akpinar, A. Midilli, et Y. Bicer, « Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling », *Energy Convers. Manag.*, vol. 44, n° 10, p. 1689-1705, juin 2003.
- [157] S. Simal, A. Femenia, M. C. Garau, et C. Rosselló, « Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit », *J. Food Eng.*, vol. 66, n° 3, p. 323-328, févr. 2005.
- [158] A. Talla, « Experimental determination and modelling of the sorption isotherms of kilishi », *Br. J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 2, n° 4, p. 379-389, janv. 2012.
- [159] G. Mazza et M. LeMaguer, « Water sorption properties of yellow globe onion (*Allium cepa* L.) », *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.*, vol. 11, n° 4, p. 189-193, oct. 1978.
- [160] C. T. Kiranoudis, Z. B. Maroulis, E. Tsami, et D. Marinos-Kouris, « Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables », *J. Food Eng.*, vol. 20, n° 1, p. 55-74, janv. 1993.
- [161] R. Viswanathan, D. S. Jayas, et R. B. Hulasare, « Sorption isotherms of tomato slices and onion shreds », *Biosyst. Eng.*, vol. 86, n° 4, p. 465-472, déc. 2003.
- [162] E. Adam, W. Mühlbauer, A. Esper, W. Wolf, et W. Spieß, « Effect of Temperature on Water Sorption Equilibrium of Onion (*allium Cepa* L) », *Dry. Technol.*, vol. 18, n° 9, p. 2117-2129, oct. 2000.
- [163] M. M. Alam et M. N. Islam, « Study on water sorption isotherm of summer onion », *Bangladesh J. Agric. Res.*, vol. 40, n° 1, p. 35–51, 2015.
- [164] A. A. Bouba *et al.*, « Desorption isotherms, net isosteric heat and the effect of temperature and water activity on the antioxidant activity of two varieties of onion (*Allium cepa* L) », *Int. J. Food Sci. Technol.*, vol. 49, n° 2, p. 444-452, févr. 2014.
- [165] J. Blahovec, « Sorption isotherms in materials of biological origin mathematical and physical approach », *J. Food Eng.*, vol. 65, n° 4, p. 489-495, déc. 2004.
- [166] H. A. Iglesias et J. Chirife, « An empirical equation for fitting water sorption isotherms of fruits and related products », *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.*, vol. 11, n° 1, p. 12-15, janv. 1978.
- [167] F. Cladera-Olivera, L. D. F. Marczak, C. P. Z. Noreña, et A. C. Pettermann, « Modeling water adsorption isotherms of pinhão (*araucaria angustifolia* seeds) flour and thermodynamic analysis of the adsorption process: adsorption isotherms of pinhão flour »,

- J. Food Process Eng.*, vol. 34, n° 3, p. 826-843, juin 2011.
- [168] M. Peleg, « Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms », *J. Food Process Eng.*, vol. 16, n° 1, p. 21-37, févr. 1993.
- [169] A. Benseddik, A. Azzi, et A. ALLAF, « Modélisation des isothermes de désorption de la citrouille en vue de leur séchage solaire », *Revue des Energies Renouvelables (SIENR)*, n° 14, p. 173-182, 2014.
- [170] B. Touati, B. Lips, B. Benyoucef, J. Virgone, A. Jamali, et M. Kouhila, « Effet de la température sur les isothermes et la chaleur isostérique de sorption des feuilles de menthe (*mentha viridis*) », in *Congres Annuel de la Société Française de la Thermique (SFT'07)*, 2007.
- [171] A. Touil, J. Litaïem, et F. Zagrouba, « Isothermes de sorption et propriétés thermodynamique de l'*Allium sativum* », *J. Tunis. Chem. Soc.*, vol. 17, p. 105–114, 2015.
- [172] C. F. García, P. C. Moyano, et F. Pedreschi, « Enthalpy-entropy compensation for water loss of vegetable tissues during air drying », *Dry. Technol.*, vol. 26, n° 12, p. 1563-1569, nov. 2008.
- [173] P. S. Madamba, R. H. Driscoll, et K. A. Buckle, « Enthalpy-entropy compensation models for sorption and browning of garlic », *J. Food Eng.*, vol. 28, n° 2, p. 109-119, mai 1996.
- [174] S. Simal, A. Femenia, Á. Castell-Palou, et C. Rosselló, « Water desorption thermodynamic properties of pineapple », *J. Food Eng.*, vol. 80, n° 4, p. 1293-1301, juin 2007.
- [175] A. Jamali, M. Kouhila, L. A. Mohamed, A. Idlimam, et A. Lamharrar, « Moisture adsorption–desorption isotherms of *Citrus reticulata* leaves at three temperatures », *J. Food Eng.*, vol. 77, n° 1, p. 71-78, nov. 2006.
- [176] P. C. Corrêa, M. F. T. Reis, G. H. H. de Oliveira, A. P. L. R. de Oliveira, et F. M. Botelho, « Moisture desorption isotherms of cucumber seeds: modeling and thermodynamic properties », *J. Seed Sci.*, vol. 37, n° 3, p. 218-225, sept. 2015.
- [177] J. Augustin, « Habilitation à diriger des recherche: Modélisation de la croissance microbienne et gestion de la sécurité sanitaire des aliments », 2005.
- [178] P. F. Hamadi, « Microorganismes et Aliments », Université Ibn Zohr. Faculté des Sciences. Agadir, 2014.
- [179] D. Machiels et L. Istasse, « La réaction de Maillard : importance et application en chimie », vol. 146, p. 347-352, 2002.

ANNEXES

Annexe A : Valeurs Nutritionnelles de Référence recommandées par le règlement européen 1169/2011.

Vitamine	VNR	Minéraux	VNR (mg)
Vitamine A (rétinol)	800µg	Potassium	2000
Vitamine D3	5 µg	Calcium	800
Vitamine E	12 mg	Magnésium	375
Vitamine K	75 µg	Phosphore	700
Vitamine C	80 mg	Chlorure	800
Vitamine B1	1,1 mg	Fer	14
Vitamine B2	1,4 mg	Zinc	10
Vitamine B3	16 mg	Manganèse	2
Vitamine B9	200 µg	Sélénium	55 µg
Vitamine B5	6 mg	Iode	150 µg

Énergie ou Nutriments	VNR
Énergie	2000 Kcal
Matières Grasses Totales	70 g
Acides Gras Saturés	20 g
Glucides	260 g
Sucres	90 g
Protéines	50 g
Sel	6 g

Annexe B : Production d'oignon en tonnes par continent.

Année	Monde	Afrique	Amérique	Asie	Europe	Océanie
2000	49 966 784	3 918 789	7 984 759	30 246 014	7 570 152	247 069
2001	51 764 876	4 182 132	7 688 272	32 122 188	7 550 360	221 923
2002	52 648 063	4 754 078	8 220 953	31 986 864	7 403 650	282 518
2003	56 374 929	5 398 155	8 643 063	34 633 407	7 471 693	228 610
2004	62 444 940	6 684 910	9 052 228	37 597 045	8 877 399	233 358
2005	65 686 006	7 104 368	8 702 694	41 155 122	8 467 817	256 005
2006	68 303 591	7 358 681	8 736 707	43 717 071	8 269 204	221 929
2007	73 162 143	7 477 503	9 260 661	48 315 685	7 861 788	246 506
2008	74 579 993	8 096 122	8 928 608	48 496 774	8 804 117	254 372
2009	73 878 439	8 681 042	9 256 078	46 821 764	8 835 724	283 830
2010	78 984 889	9 128 322	9 559 514	51 372 218	8 664 877	259 958
2011	84 856 696	9 577 039	9 544 750	55 223 215	10 180 832	330 859
2012	82 158 344	9 298 323	9 149 265	53 885 966	9 478 136	346 653
2013	84 375 135	8 755 292	9 135 046	57 057 110	9 126 000	301 686
2014	88 475 089	10 435 775	9 450 840	58 443 271	9 889 143	256 059

Source : [20]

Annexe C : Production d'oignon en tonnes dans le continent Africain.

Année	Monde	Afrique	Afrique Centrale	Afrique de l'Est	Afrique de l'Ouest	Afrique du Nord	Afrique du Sud
2000	49 966 784	3 918 789	137 233	439 427	1 103 175	1 906 004	332 950
2001	51 764 876	4 182 132	137 783	467 360	1 070 202	2 169 547	337 241
2002	52 648 063	4 754 078	140 943	497 183	1 154 848	2 611 352	349 753
2003	56 374 929	5 398 155	145 740	577 990	1 152 011	3 155 628	366 787
2004	62 444 940	6 684 910	147 814	652 402	1 567 648	3 906 246	410 800
2005	65 686 006	7 104 368	155 381	686 699	1 641 531	4 224 900	395 857
2006	68 303 591	7 358 681	164 478	702 288	1 666 670	4 412 463	412 782
2007	73 162 143	7 477 503	175 319	748 547	1 834 385	4 274 942	444 310
2008	74 579 993	8 096 122	183 341	782 513	2 003 259	4 615 643	511 366
2009	73 878 439	8 681 042	124 882	802 526	2 012 368	5 260 340	480 926
2010	78 984 889	9 128 322	140 464	937 358	2 028 534	5 483 232	538 733
2011	84 856 696	9 577 039	190 009	1 049 404	1 981 949	5 748 019	607 659
2012	82 158 344	9 298 323	275 134	973 499	1 969 978	5 424 235	655 477
2013	84 375 135	8 755 292	288 073	1 063 169	2 019 084	4 776 179	608 788
2014	88 475 089	10 435 775	287 383	1 115 456	2 277 860	6 085 633	669 443

Source : [20]

Annexe E : Données Climatologiques.

Annexe E.1 : Données d'insolation.

Source : ANACIM.

Insolation moyenne mensuelle (heures et dixièmes).

Station	Années	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Dakar	2004	6,8	7,6	8,7	9,7	9,9	7,3	6,5	7,6	7,5	8,6	8,2	7,6
Dakar	2005	5,9	7,9	10,2	9,7	7,7	9,2	7,0	6,6	6,7	7,6	7,7	7,4
Dakar	2006	7,7	8,2	8,6	9,9	9,8	8,9	7,3	7,8	7,7	8,1	9,9	8,2
Dakar	2007	7,8	8,7	8,8	9,2	9,7	7,9	6,9	7,0	7,3	8,6	8,2	8,6
Dakar	2008	8,0	9,0	9,4	9,9	10,3	8,4	7,5	7,0	7,7	7,8	9,1	8,5
Dakar	2009	9,1	9,2	9,4	10,3	9,4	8,5	7,9	6,8	5,2	9,0	7,7	7,2
Dakar	2010	8,6	10,1	8,9	9,0	7,2	7,9	6,6	7,5	6,1	8,0	9,5	8,5
Dakar	2011	7,2	9,4	10,0	9,7	10,1	11,7	7,9	6,3	7,9	8,7	9,1	8,8
Dakar	2012	6,6	6,1	6,5	8,0	8,5	7,9	7,4	7,0	7,0	9,1	7,8	8,2
Dakar	2013	7,1	7,6	9,7	9,3	9,7	6,9	7,9	5,7	6,4	8,1	7,1	7,6
Dakar	2014	8,4	9,0	9,0	9,6	8,9	8,2	8,3	7,4	7,2	9,6	9,3	6,4

Station	Années	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
St-Louis	2004	6,5	5,8	6,3	8,2	8,8	5,8	7,1	7,7	6,9	7,8	8,1	6,7
St-Louis	2005	6,9	8,7	8,2	8,3	8,0	6,9	7,5	7,9	6,6	8,4	6,9	5,9
St-Louis	2006	7,8	8,8	9,3	7,7	6,7	6,8	7,0	7,3	6,8	7,1	7,7	8,6
St-Louis	2007	6,9	6,5	8,2	9,1	8,5	5,4	5,3	7,1	7,6	9,0	8,2	6,8
St-Louis	2008	7,2	6,2	8,1	9,0	8,8	6,4	6,5	7,7	8,0	8,1	7,2	8,6
St-Louis	2009	6,5	8,1	7,3	9,0	8,8	6,5	7,6	8,0	8,2	7,3	7,5	8,0
St-Louis	2010	6,5	7,3	7,9	9,0	7,3	5,9	7,0	8,2	7,9	8,0	6,2	7,8
St-Louis	2011	7,8	9,1	9,7	9,7	9,2	6,8	7,7	6,5	8,1	8,0	9,4	7,7
St-Louis	2012	6,6	6,4	6,6	7,2	7,1	7,0	6,9	6,5	7,7	9,2	8,0	8,0
St-Louis	2013	7,4	9,0	10,1	9,8	9,3	7,2	6,5	7,1	6,4	8,0	6,9	7,3
St-Louis	2014	8,1	9,9	9,7	9,8	9,3	7,2	6,8	6,7	7,6	9,7	9,0	5,8

Station	Années	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Podor	2004	8,3	7,8	8,4	9,8	10,4	8,4	7,8	6,5	6,5	7,5	6,8	7,0
Podor	2005	4,8	6,4	9,8	8,6	5,4	6,6	6,4	3,8	6,8	7,5	7,4	6,5
Podor	2006	7,1	7,6	7,1	9,0	9,0	5,8	6,2	7,4	7,3	7,6	8,8	6,9
Podor	2007	6,2	8,2	7,6	9,7	9,0	9,0	7,3	6,4	7,5	8,1	7,4	7,7
Podor	2008	6,8	7,2	8,5	7,8	9,2	7,4	6,1	6,8	7,1	6,9	8,2	7,3
Podor	2009	8,8	8,9	9,3	10,1	8,6	5,4	8,1	7,8	7,2	8,1	6,6	7,2
Podor	2010	8,5	9,0	7,8	9,1	7,7	8,1	6,5	7,2	7,4	7,4	8,9	7,3
Podor	2011	6,9	8,8	9,8	9,3	8,3	8,0	8,4	7,0	8,8	7,4	10,0	7,1
Podor	2012	6,9	5,9	5,9	7,9	7,2	6,8	7,1	7,1	7,6	8,9	8,4	8,1
Podor	2013	7,3	9,1	9,9	9,9	9,1	8,5	7,5	7,8	7,2	8,1	7,2	7,4
Podor	2014	8,1	9,2	10,3	10,4	9,9	7,6	7,4	6,9	8	9,7	9,1	5,7

Station	Années	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Matam	2004	7,6	6,7	6,8	8,7	9,6	7,1	6,4	6,9	7,0	7,3	7,6	7,1
Matam	2005	5,3	6,4	9,3	8,6	6,3	6,3	6,4	6,3	6,6	6,7	7,4	6,5
Matam	2006	7,1	7,7	7,3	8,7	9,1	7,4	6,8	6,2	7,7	7,6	9,3	7,5
Matam	2007	6,2	8,0	8,2	9,1	7,4	7,1	6,5	5,4	7,3	7,3	7,7	7,3
Matam	2008	7,8	7,4	9,0	8,1	9,4	7,9	6,5	7,4	7,3	6,6	8,5	4,8
Matam	2009	8,0	8,4	8,4	9,6	8,8	5,6	6,7	7,3	6,7	7,9	6,9	6,4
Matam	2010	7,9	8,9	7	7,3	5,6	7,2	5,4	6,2	6,4	7,2	8,4	6,4
Matam	2011	7,0	9,0	9,0	8,4	7,8	7,7	7,6	6,9	8,0	7,3	8,1	6,4
Matam	2012	7,6	6,5	5,3	6,7	7,6	7,0	7,5	6,6	6,7	8,8	8,0	7,7
Matam	2013	7,0	8,1	8,1	8,5	8,2	7,2	7,2	7,1	8,1	8,2	7,2	6,3
Matam	2014	8,7	7,6	9,1	9,6	9,1	7,6	8,8	6,6	7,3	8,3	7,4	5,7

Station	Années	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Bakel	2004	7,4	6,9	7,8	9,0	9,6	7,8	6,7	7,4	7,9	7,2	7,8	7,2
Bakel	2005	6,8	6,9	9,6	9,3	8,5	7,5	6,5	6,3	7,3	7,0	7,8	7,7
Bakel	2006	7,0	8,0	7,1	8,5	8,7	6,7	8,0	7,0	6,9	X	X	7,7
Bakel	2007	7,6	7,9	7,5	9,0	7,7	8,9	7,4	4,8	6,7	7,5	8,1	8,5
Bakel	2008	8,7	7,7	9,0	8,6	8,4	6,8	6,8	6,4	7,3	6,4	8,6	7,8
Bakel	2009	8,8	8,1	8,7	9,9	8,8	6,2	7,7	7,2	6,6	7,8	7,6	7,1
Bakel	2010	8,4	8,8	7,7	8,0	8,3	8,6	6,4	6,4	5,6	6,8	8,7	8,1
Bakel	2011	6,7	9	8,9	9	8	8,3	8,5	6,5	7,8	8	8,9	7,9
Bakel	2012	8,1	6,8	6,6	7,1	9,3	7,8	7,6	6,7	6,5	8,5	8,2	7,2
Bakel	2013	7,3	9,2	9,9	10,2	9,7	8,8	8	6,9	7,4	8,1	7,7	7,2

Station	Années	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Louga	2004	8,3	8,2	8,5	8,4	8,7	7,3	7,4	8,2	7,5	8,9	8,5	6,4
Louga	2005	5,5	8,8	8,9	7,8	9,5	7,7	8,3	8,2	7,1	6,8	7,3	6,4
Louga	2006	8,7	9,5	8,2	6,8	9,4	8,0	8,5	8,3	7,9	8,7	8,7	7,3
Louga	2007	8,1	8,4	10,1	9,0	8,8	8,3	7,6	8,5	8,1	8,0	7,7	9,2
Louga	2008	7,6	7,2	8,5	8,6	8,0	7,3	8,6	6,9	8,0	8,8	8,3	7,2
Louga	2009	7,1	8,6	9,4	8,4	8,7	8,8	8,6	7,6	7,8	8,1	7,2	8,5
Louga	2010	8,7	8,9	6,1	9,1	9,3	7,7	7,8	8,1	7,9	8,3	9,4	7,7
Louga	2011	8,2	8,4	9,6	8,8	8,5	8,1	7,3	8,1	7,9	7,8	7,4	8,1
Louga	2012	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Louga	2013	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Louga	2014	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Station	Années	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Thiès	2004	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Thiès	2005	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Thiès	2006	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Thiès	2007	8,8	9,8	8,4	10,0	10,6	9,1	8,2	8,9	7,4	9,6	9,8	7,5
Thiès	2008	8,1	10,2	9,9	10,8	9,9	9,1	7,9	7,9	7,8	8,8	7,6	7,7
Thiès	2009	7,6	10,5	9,4	10,0	9,2	8,4	9,1	8,7	8,5	9,2	9,5	8,0
Thiès	2010	9,2	8,2	8,6	9,8	8,4	7,2	6,5	6,4	6,4	7,9	8,9	8,0
Thiès	2011	8,9	10,1	9,3	10,3	9,8	8,8	7,9	X	X	X	X	X
Thiès	2012	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Thiès	2013	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Thiès	2014	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Annexe E.2 : Données d'irradiation.

Source : DASTPVPS\SOLARIRR.INS. Edité par: PSAES, Projet Sénégal-Allemand
Énergie Solaire.

Irradiation moyenne annuelle (Wh / m²/ j).

Mois	Dakar	Louga	Thiès	Saint-Louis	Podor	Matam	Bakel	Fatick	Kaolack
Janv	4675	5420	5630	4140	5430	5720	5600	5220	4873
Févr	5360	6010	6290	4955	5830	6240	6130	6070	5734
Mars	6234	6890	7030	5908	6610	6960	6780	6810	6070
Avr	6698	6520	6740	6420	6120	6190	6160	6580	6559
Mai	6245	6680	7000	5990	6310	6580	6230	6770	6327
Juin	5873	5710	6040	5595	5510	5710	5440	5540	5710
Juil	5292	5070	4870	5430	5050	5190	4870	4650	5187
Août	4873	4360	3890	5280	4450	4670	4200	4000	5396
Sept	5360	4360	4240	5385	4630	4950	4720	4010	5500
Oct	5338	5720	5560	5105	5600	5760	5640	5160	5454
Nov	5117	5830	5930	4605	5610	5940	6020	5420	4815
Déc	4280	5520	5700	3756	5320	5590	5570	5190	4430

Annexe F : Calendrier de disponibilité des fruits et légumes au Sénégal.



Fruits et légumes frais
CALENDRIER DE DISPONIBILITÉ



BANANE *Musa spp.*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
VFS (Saint-Louis, Fatick)	***												
Dakar (Dakar, Thiès)	**												
Diourbel (Diourbel, Casamance (Ziguinchor))	**												

TOMATE *Solanum lycopersicum*



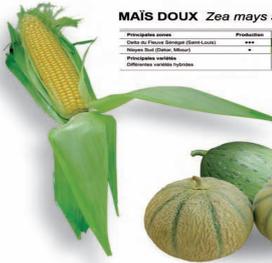
Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Niamez Sud (Dakar, Thiès)	**												
Casamance (Ziguinchor)	**												

LIME VERTE *Citrus aurantifolia*



OIGNON *Allium cepa* var. *cepa*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Vallee du Fleuve Sénégal (Fatick)	***												
Niamez Nord (Dakar, Fatick, Diourbel)	**												
Niamez Centre & Sud (Thiès, Dakar)	**												



MAÏS DOUX *Zea mays saccharata*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Vallee du Fleuve Sénégal (Saint-Louis)	***												
Diourbel (Diourbel)	**												

PIMENT *Capsicum spp.*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Vallee du Fleuve Sénégal	**												
Niamez Sud (Dakar, Thiès)	**												



POIVRON *Capsicum annuum*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Vallee du Fleuve Sénégal (Saint-Louis)	***												
Niamez (Dakar)	**												



MELON *Cucumis melo*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Dakota du Fleuve Sénégal (Saint-Louis)	***												
Niamez Sud (Dakar, Thiès)	**												

POMME DE TERRE *Solanum tuberosum*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Niamez (Dakar)	**												
Casamance (Ziguinchor)	**												



HARICOT VERT *Phaseolus vulgaris*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Vallee du Fleuve Sénégal (Saint-Louis)	***												
Niamez (Dakar, Thiès)	**												



PATATE DOUCE *Ipomoea batatas*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
VFS (Saint-Louis, Fatick)	***												
VFS (Dakar de Dakar, Niamez)	**												



POMELO *Citrus paradisi*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
VFS (Saint-Louis)	***												
Niamez Sud (Dakar, Thiès)	**												



TOMATE CERISE *Solanum lycopersicum cerasiforme*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
VFS (Saint-Louis, Lou de Océan)	***												
Niamez (Dakar)	**												



GOMBO *Hibiscus esculentus*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Vallee du Fleuve Sénégal (Fatick)	***												
Niamez (Dakar, Thiès)	**												



PASTÈQUE *Citrullus lanatus*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Dakota du Fleuve Sénégal (Saint-Louis)	***												
Diourbel (Diourbel)	**												



ANANAS *Ananas comosus*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Casamance (Ziguinchor)	**												
Casamance (Ziguinchor)	**												



PAPAYE *Carica oapaya*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Niamez (Dakar)	***												
Diourbel (Diourbel, Fatick, Niamez)	**												



OIGNON VERT *Allium cepa L. var. aggregatum*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
VFS (Dakar de Dakar)	**												



MANGUE *Mangifera L. indica*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Niamez Sud (Dakar)	***												
Niamez Sud (Thiès)	**												



COURGETTE, CHOU, CAROTTE, AUBERGINE

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Niamez Sud (Dakar, Thiès) et autres à disponibilité moyenne	***												
Diourbel (Diourbel)	**												



ASPERGE *Asparagus officinalis*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Dakota du Fleuve Sénégal (Saint-Louis)	***												



COURGE *Cucurbita moschata*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Dakota du Fleuve Sénégal (Saint-Louis)	**												



FRAISE *Fragaria spp.*

Principales zones	Production	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Niamez Sud (Dakar, Thiès)	**												



LEGENDE

VFS Vallee du Fleuve Sénégal

- Zone de faible production
- Zone de forte production
- Zone principale de production

FRUITS **LEGUMES**

●●●●● Période de faible disponibilité

●●●●● Période de disponibilité moyenne

●●●●● Période de forte disponibilité

PRINCIPAUX MARCHÉS

- Marchés urbains nationaux et sous-régionaux (grands centres)
- Marchés régionaux (zones par voie routière)
- Marchés d'exportation de niche par avion (produits et services spécialisés)
- Marchés en concessionnement privé
- Produits destinés à la transformation et marchés agro-industriels
- Produits destinés à la fabrication industrielle (CABRI)
- Nouveaux marchés potentiels identifiés

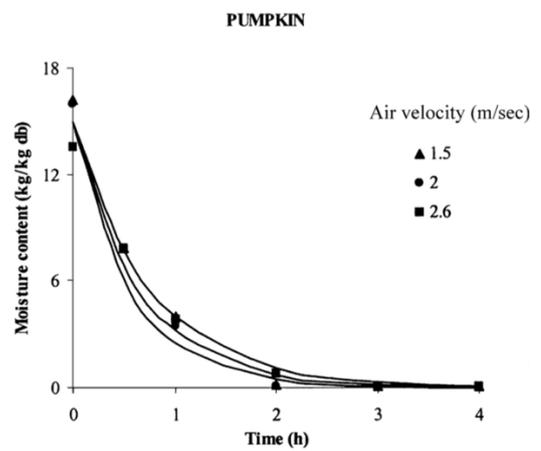
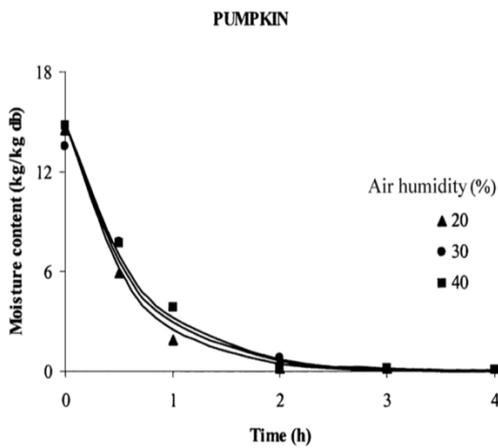
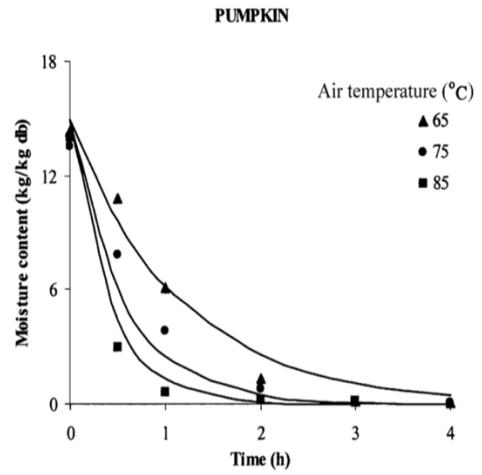
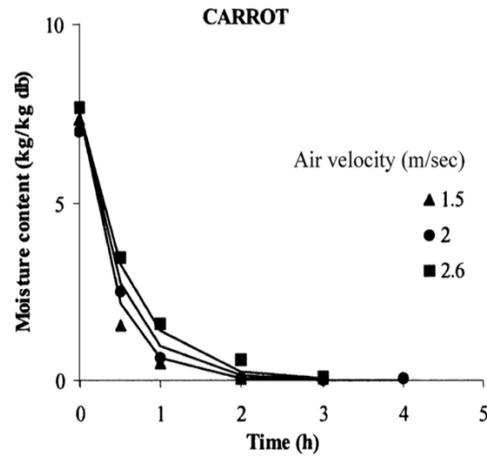
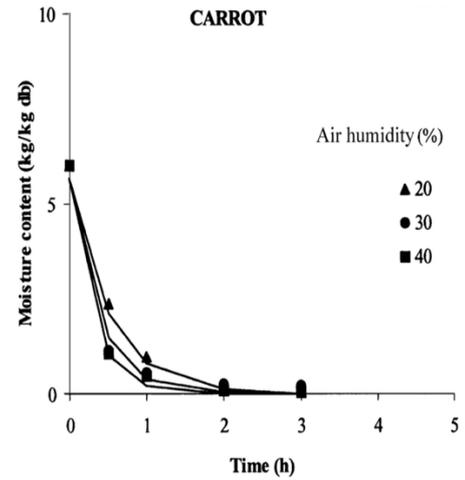
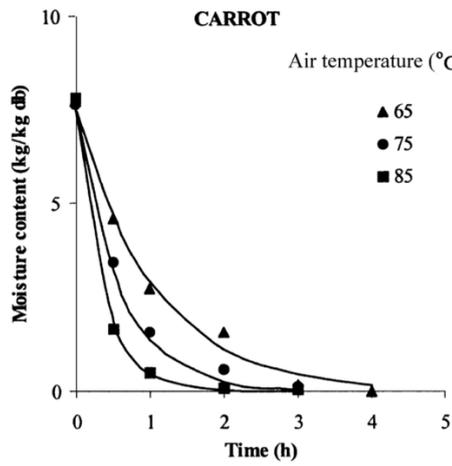
Cette affiche ne tient pas compte de l'état réel des produits.

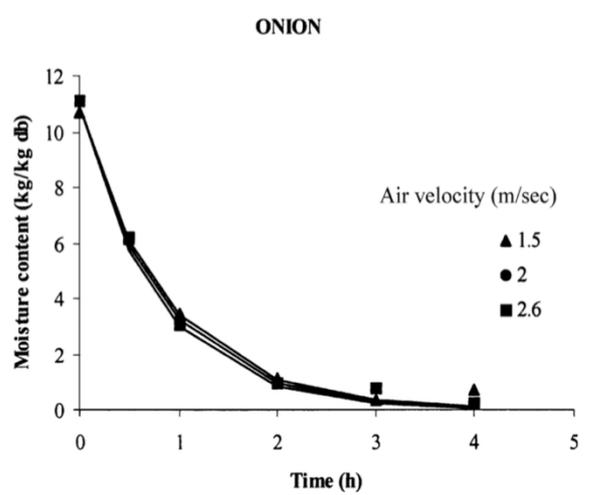
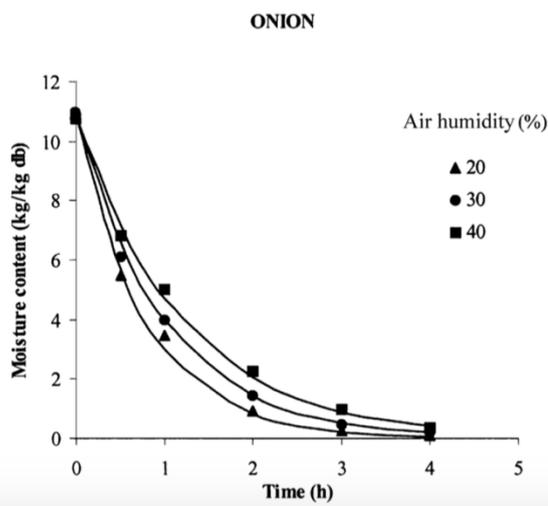
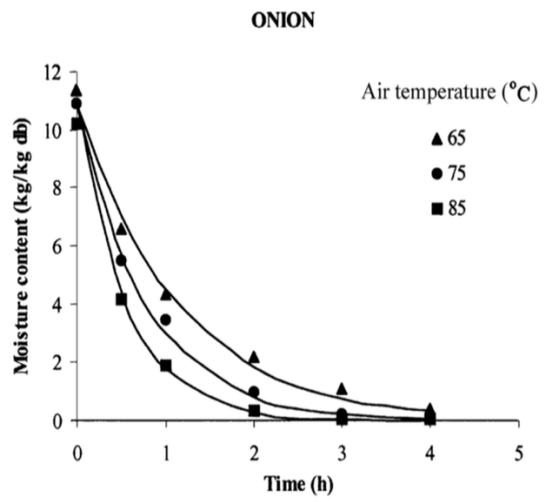
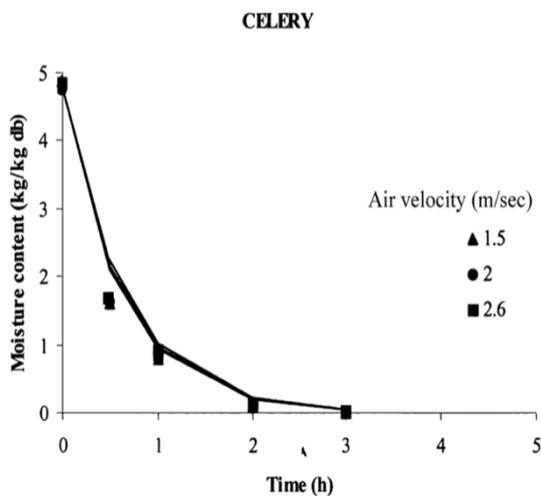
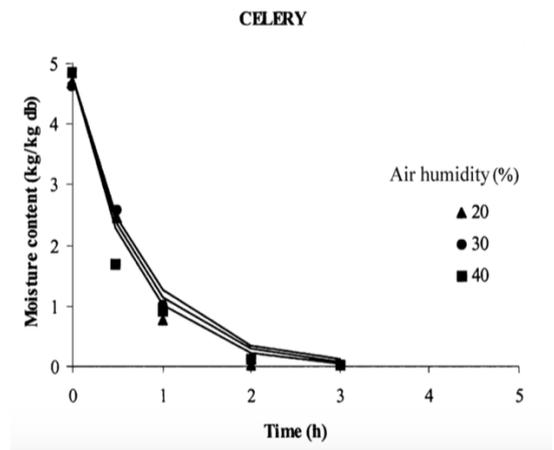
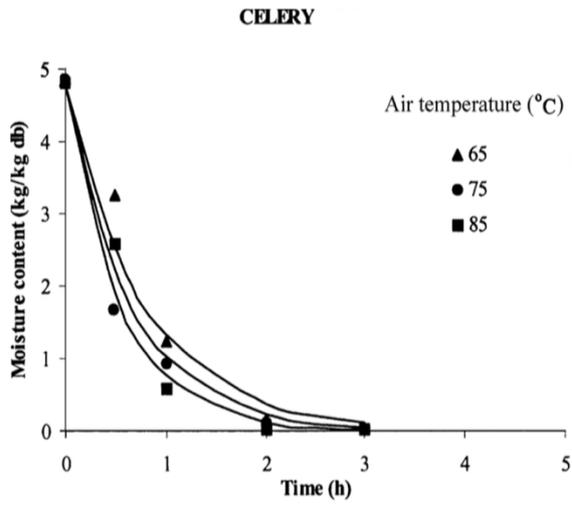


PROGRAMME DE DEVELOPPEMENT DES MARCHES AGRICOLES DU SENEGAL
Almadies, Route du Méridien Président (face Hôtel Fana), BP 22 579 Dakar Ponty - Sénégal
Tel +221 33 869 62 62 / Fax +221 33 869 62 64 / Email pdmas@pdmas.org / Web www.pdmas.org



Annexe G : Exemples de cinétiques de séchage montrant l'influence de certains paramètres.





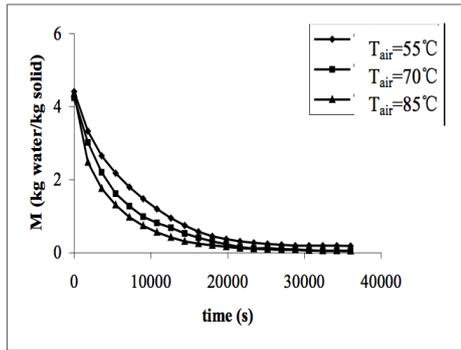


Figure 5. Evolution of the average moisture content of the product ($U_{air} = 0.5 \text{ m/s}$).

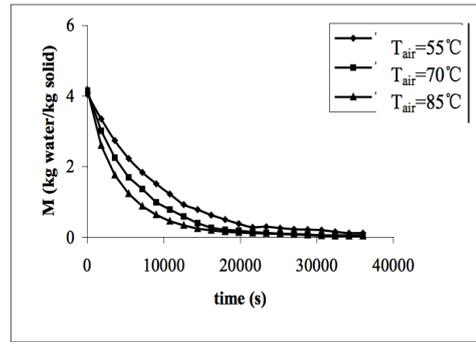
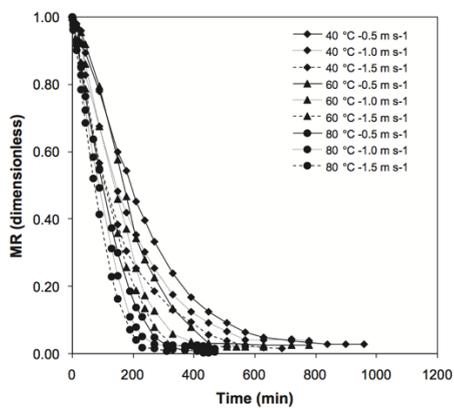
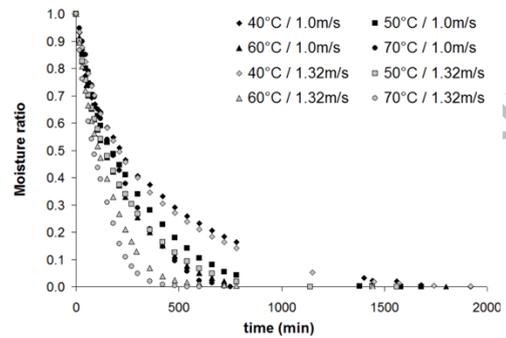


Figure 6. Evolution of the average moisture content of the product ($U_{air} = 1 \text{ m/s}$).

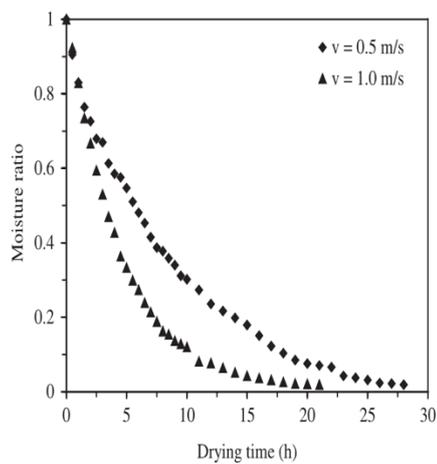
Pomme de terre



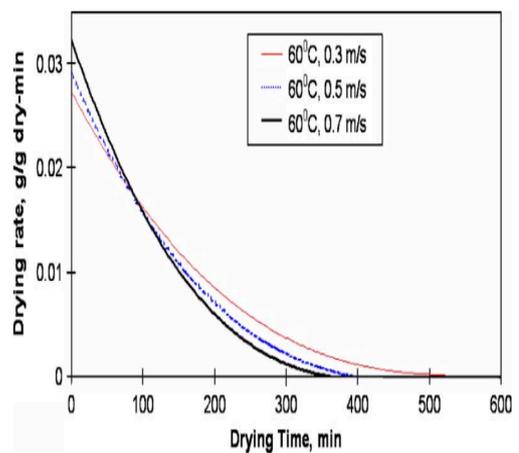
Pomme de terre



Pomme



Papaye



Carotte

Banane

Annexe H : Tableau des réactifs utilisés.

Réactif	Pureté (%)	Fabricant
Acétone / Eau 70/30		
Acide borique		
Acide chlorhydrique	37	Analar Normapur
Acide citrique		
Acide gallique		
Acide sulfurique	95-98	Panreac
Carbonate de sodium	99,8	Scharlau
Iodure de potassium		
Lessive de soude		
Réactif de Folin	-	Carlo Erba reagents
Rouge de méthyle		
Sélénium (pastille)		
Soude	97	Fisher Scientific
Sulfate de cuivre		
Thiosulfate de sodium		
Vert de bromocrésol		
Solvant élution		

Annexe I : Extrait table des valeurs pour 25 ml de réactif selon Luff-Schoorl.

Thiosulfate de sodium Na ₂ S ₂ O ₃ 0,1N (mL)	Glucose, fructose, Sucre inverti (mg)	Lactose (mg)	Maltose (mg)
1	2,4	3,6	3,9
2	4,8	7,2	7,8
3	7,2	11,0	11,
4	9,7	14,7	15,6
5	12,2	18,2	19,6
6	14,7	22,1	23,5
7	17,2	25,8	27,5
8	19,8	29,5	31,5
9	22,4	33,2	35,5
10	25,0	37,0	39,5
11	27,6	40,8	43,5
12	30,3	44,6	47,5
13	33,0	48,4	51,6
14	35,7	52,2	55,7
15	38,2	56,0	59,8
16	41,3	59,9	63,9
17	44,2	63,8	68,0
18	47,1	67,7	72,2
19	50,0	71,7	76,5
20	53,0	75,7	80,9
21	56,0	79,8	85,4
22	59,1	83,9	90,0
23	62,2	88,0	94,6

Annexe J : Compositions de l'oignon en poudre et en flocons déshydratés Extraites de la table de composition des aliments.

Oignon en Poudre					
Minéraux	Valeur (mg)	Macronutriments	Valeur (g)	Vitamines	Valeur (mg)
Calcium	384	Eau	5,59	Folacine	64 µg
Fer	3,9	Glucides	79,12	B6	0,718
Magnésium	113	Protéines	10,41	Choline	39
Phosphore	322	Cendres	4,04	C	23,4
Potassium	985	Lipides	1,04		
Sodium	73	Énergie en Kcal	342		
Zinc	4,05	Fibres alimentaires totales	15,2		
Cuivre	0,59	Sucres réducteurs	6,63		
Manganèse	1,3				
Sélénium	14,3 µg				

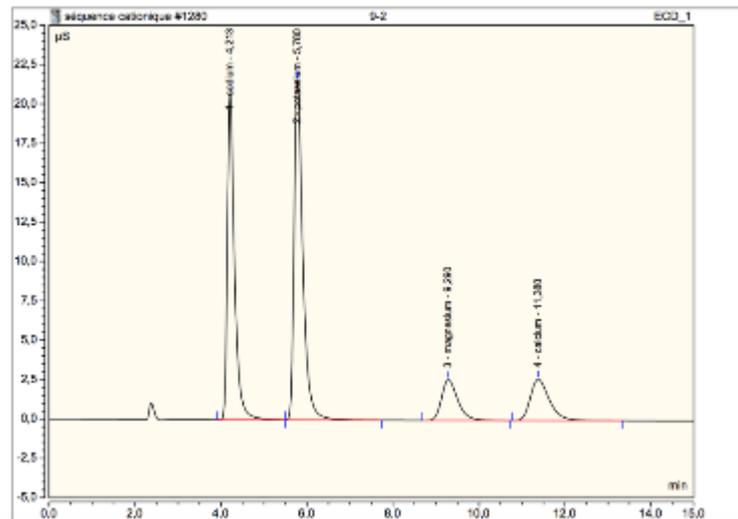
Flocons déshydratés					
Minéraux	Valeur (mg)	Macronutriments	Valeur (g)	Vitamines	Valeur (mg)
Calcium	257	Eau	3,93	Folacine	166 µg
Fer	1,55	Glucides	83,28	B6	1,6
Magnésium	92	Protéines	8,95	Choline	53,9
Phosphore	303	Cendres	3,38	C	75
Potassium	1622	Lipides	0,46		
Sodium	21	Énergie en Kcal	349		
Zinc	1,89	Fibres alimentaires totales	9,2		
Cuivre	0,416	Sucres réducteurs	37,41		
Manganèse	1,389				
Sélénium	5,0 µg				

Annexe K : Quelques exemples de chromatogrammes du profil minéraux des variétés d'oignon à l'état frais et séchées à l'étuve et en serre solaire.

Annexe K.1 : Poudre d'oignon de la variété Violet de Galmi à 50 °C et 60 °C à l'étuve.

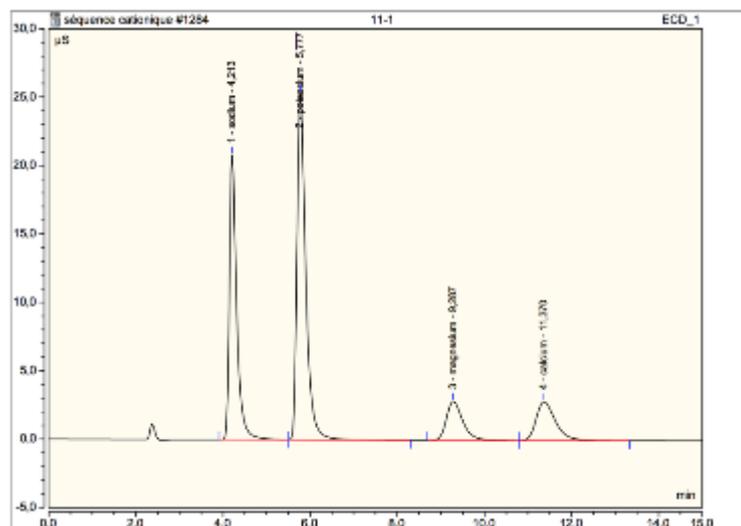
Température de séchage 50 °C.

No.	Time min	Peak Name	Peak Type	Area $\mu\text{S} \cdot \text{min}$	Height μS	Amount mg/l
1	4.21	sodium	M	4,007	20,844	14,3296
2	5.78	potassium	M	5,076	21,590	26,9186
3	9.29	magnesium	M	1,125	2,581	2,2292
4	11.38	calcium	M	1,343	2,624	4,2832
TOTAL:				11,55	47,64	49,76



Température de séchage 60 °C.

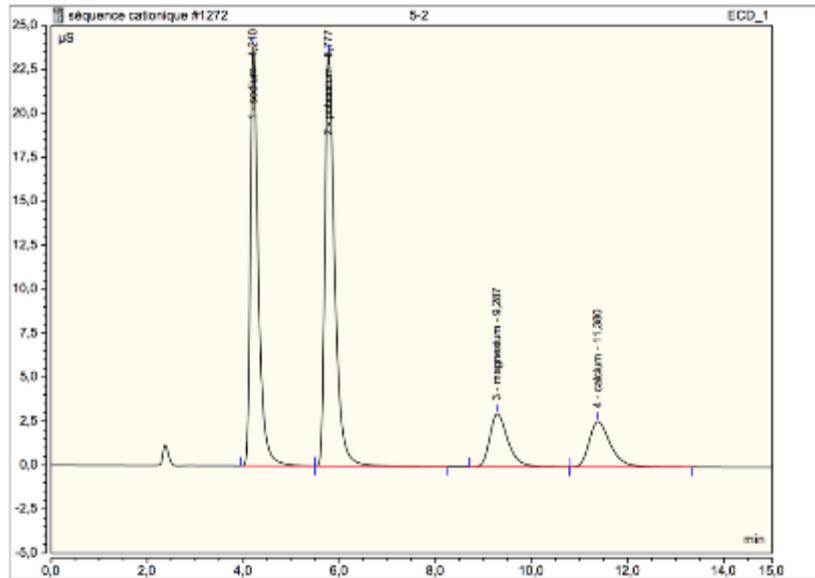
No.	Time min	Peak Name	Peak Type	Area $\mu\text{S} \cdot \text{min}$	Height μS	Amount mg/l
1	4,21	sodium	M	4,023	20,815	14,3092
2	5,78	potassium	M	5,924	25,331	33,7467
3	9,29	magnesium	M	1,238	2,838	2,4514
4	11,37	calcium	M	1,444	2,826	4,6052
TOTAL:				12,63	51,81	55,19



Annexe K.2 : Poudre d'oignon de la variété Safari à 50 °C et 60 °C à l'étuve.

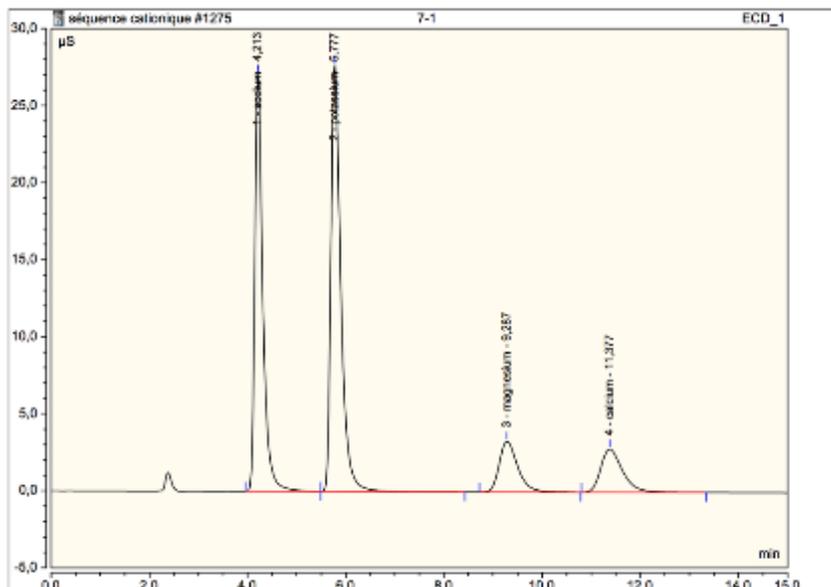
Température de séchage 50 °C.

No.	Time min	Peak Name	Peak Type	Area $\mu\text{S}\cdot\text{min}$	Height μS	Amount mg/l
1	4,21	sodium	M	4,560	23,841	16,3102
2	5,78	potassium	M	5,515	23,441	31,4165
3	9,29	magnesium	M	1,318	3,017	2,6110
4	11,38	calcium	M	1,327	2,584	4,2319
TOTAL:				12,72	52,88	54,57



Température de séchage 60 °C.

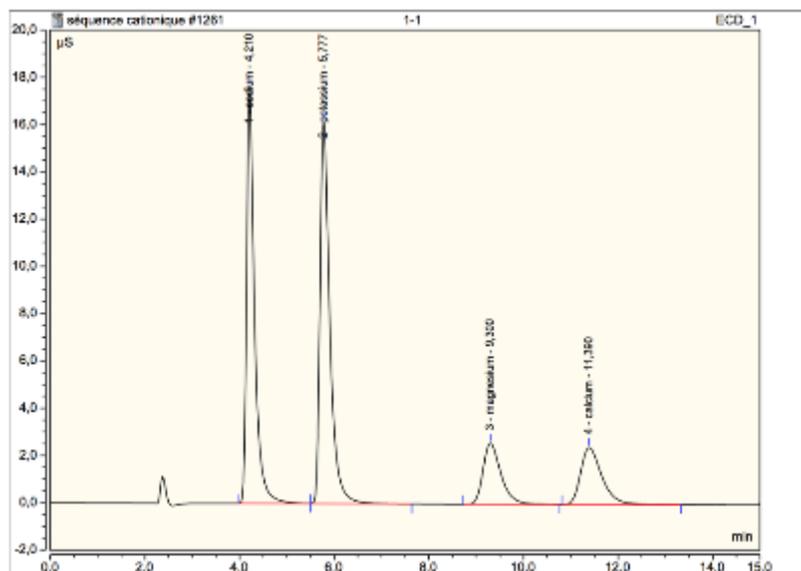
No.	Time min	Peak Name	Peak Type	Area $\mu\text{S}\cdot\text{min}$	Height μS	Amount mg/l
1	4,21	sodium	M	5,136	27,045	18,3695
2	5,78	potassium	M	6,456	27,659	36,7815
3	9,29	magnesium	M	1,437	3,300	2,8460
4	11,38	calcium	M	1,432	2,799	4,5661
TOTAL:				14,46	60,80	62,56



Annexe K.3 : Poudre d'oignon de la variété Gandiol F1 à 50 °C et 60 °C à l'étuve.

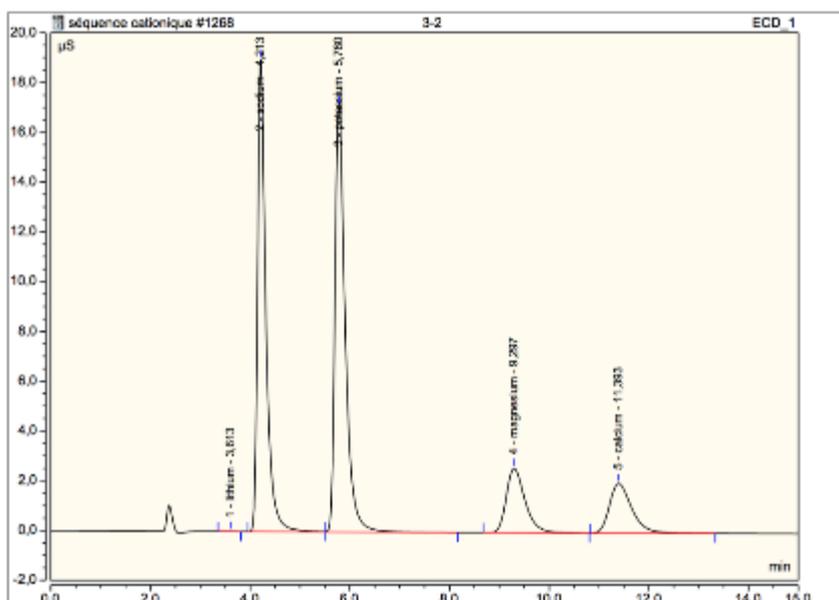
Température de séchage 50 °C.

No.	Time min	Peak Name	Peak Type	Area $\mu\text{S}\cdot\text{min}$	Height μS	Amount mg/l
1	4,21	sodium	M	3,434	17,637	12,2820
2	5,78	potassium	M	3,884	16,183	22,1279
3	9,30	magnesium	M	1,146	2,566	2,2698
4	11,39	calcium	M	1,255	2,414	4,0022
TOTAL:				9,72	38,62	40,68



Température de séchage 60 °C.

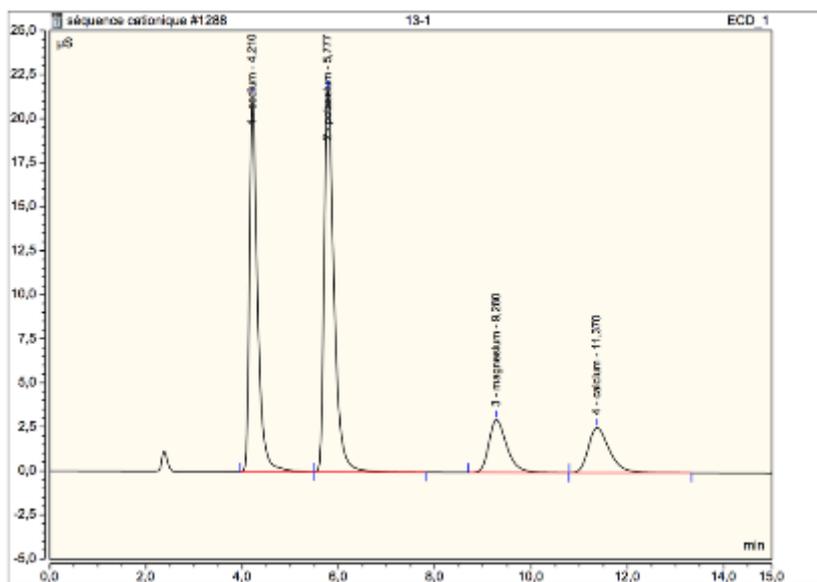
No.	Time min	Peak Name	Peak Type	Area $\mu\text{S}\cdot\text{min}$	Height μS	Amount mg/l
1	3,61	lithium	M	0,001	0,008	0,0017
2	4,21	sodium	M	3,885	18,958	13,1094
3	5,78	potassium	M	4,091	17,145	23,3059
4	9,30	magnesium	M	1,134	2,593	2,2465
5	11,39	calcium	M	1,032	1,996	3,2931
TOTAL:				9,92	40,70	41,96



Annexe K.4 : Poudre d'oignon de la variété Orient F1 à 50 °C et 60 °C à l'étuve.

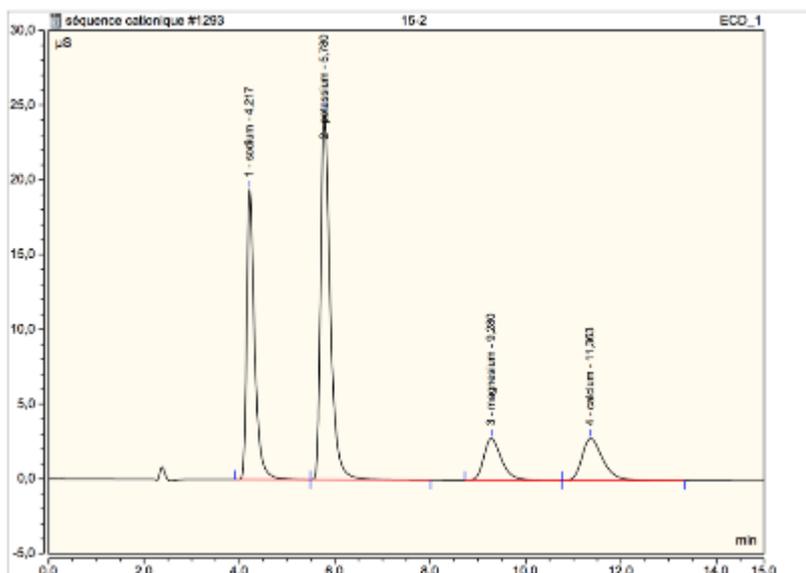
Température de séchage 50 °C.

No.	Time min	Peak Name	Peak Type	Area $\mu\text{S}\cdot\text{min}$	Height μS	Amount mg/l
1	4,21	sodium	M	4,099	21,257	14,6606
2	5,78	potassium	M	5,085	21,654	28,9681
3	9,28	magnesium	M	1,295	2,997	2,5851
4	11,37	calcium	M	1,302	2,557	4,1517
TOTAL:				11,78	48,48	50,35



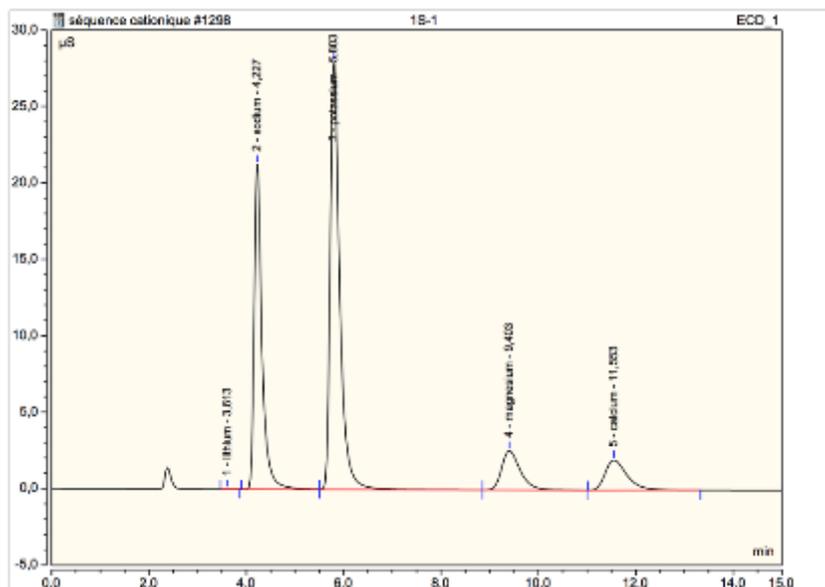
Température de séchage 60 °C.

No.	Time min	Peak Name	Peak Type	Area $\mu\text{S}\cdot\text{min}$	Height μS	Amount mg/l
1	4,22	sodium	M	3,704	19,378	13,2488
2	5,78	potassium	M	5,700	24,583	32,4713
3	9,28	magnesium	M	1,209	2,797	2,3941
4	11,36	calcium	M	1,425	2,812	4,5464
TOTAL:				12,04	49,57	52,66



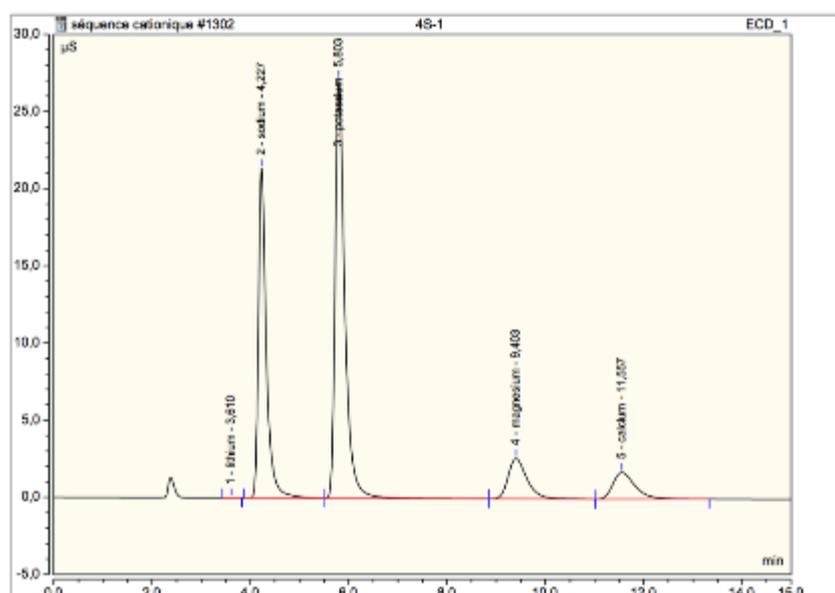
Annexe K.5 : Poudre d'oignon de la variété Violet de Galmi en serre solaire.

No.	Time min	Peak Name	Peak Type	Area $\mu\text{S}\cdot\text{min}$	Height μS	Amount mg/l
1	3,61	lithium	M	0,001	0,008	0,0016
2	4,23	sodium	M	3,967	21,251	14,1854
3	5,80	potassium	M	6,380	27,961	36,2310
4	9,40	magnesium	M	1,151	2,569	2,2790
5	11,55	calcium	M	1,040	1,978	3,3178
TOTAL:				12,52	53,77	58,02



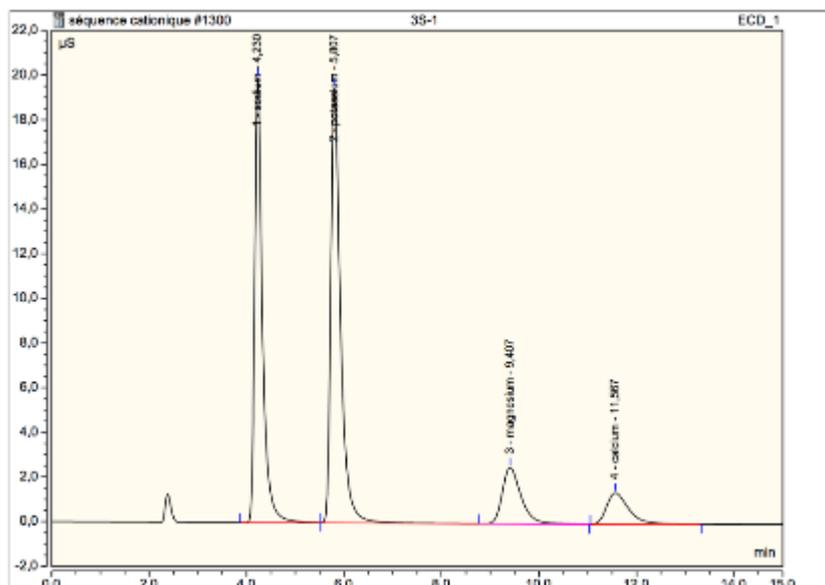
Annexe K.6 : Poudre d'oignon de la variété Safari en serre solaire.

No.	Time min	Peak Name	Peak Type	Area $\mu\text{S}\cdot\text{min}$	Height μS	Amount mg/l
1	3,61	lithium	M	0,001	0,006	0,0012
2	4,23	sodium	M	3,972	21,341	14,2059
3	5,80	potassium	M	6,150	27,054	35,0351
4	9,40	magnesium	M	1,167	2,609	2,3111
5	11,56	calcium	M	0,905	1,724	2,8875
TOTAL:				12,19	52,73	54,44



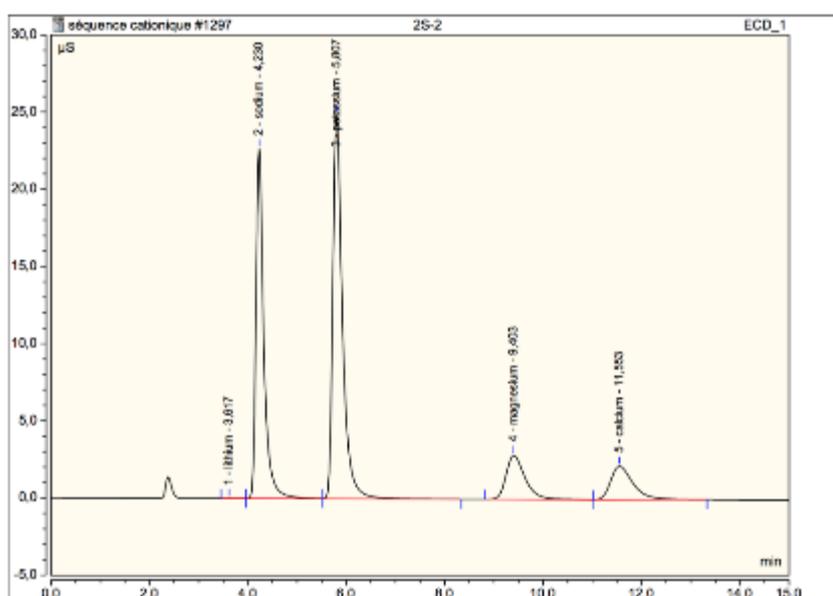
Annexe K.7 : Poudre d'oignon de la variété Gandiol Flen serre solaire.

No.	Time min	Peak Name	Peak Type	Area $\mu\text{S}\cdot\text{min}$	Height μS	Amount mg/l
1	4,23	sodium	M	3,694	19,881	13,2098
2	5,81	potassium	M	4,512	19,487	25,7057
3	9,41	magnesium	Rd	1,127	2,522	2,2318
4	11,57	calcium	M	0,736	1,399	2,3551
TOTAL:				10,07	43,29	43,50



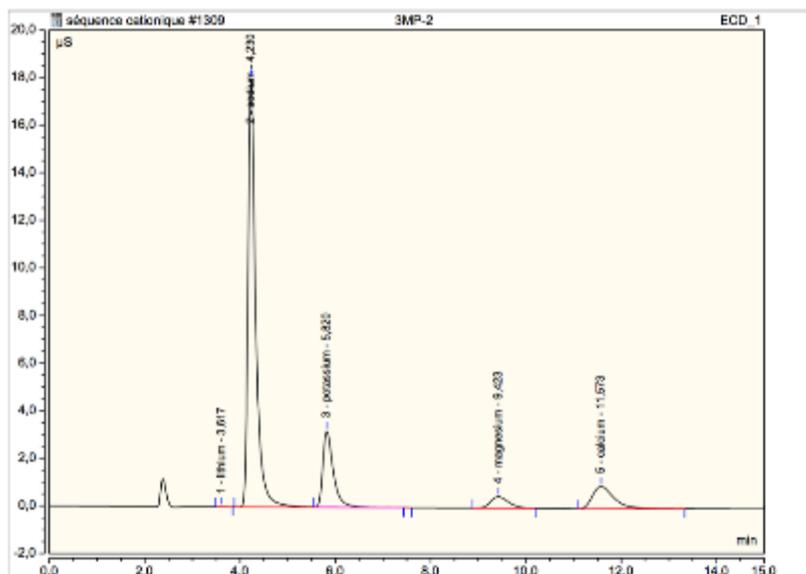
Annexe K.8 : Poudre d'oignon de la variété Orient Flen serre solaire.

No.	Time min	Peak Name	Peak Type	Area $\mu\text{S}\cdot\text{min}$	Height μS	Amount mg/l
1	3,62	lithium	M	0,002	0,010	0,0023
2	4,23	sodium	M	4,200	22,679	15,0212
3	5,81	potassium	M	5,879	24,912	32,3559
4	9,40	magnesium	M	1,273	2,843	2,5207
5	11,55	calcium	M	1,137	2,155	3,6251
TOTAL:				12,29	52,60	53,53



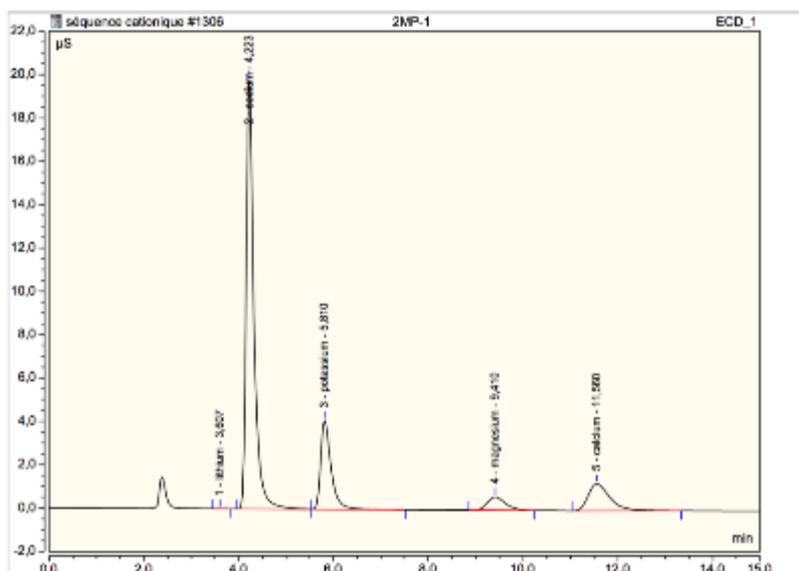
Annexe K.9 : Variété Violet de Galmi à l'état frais.

No.	Time min	Peak Name	Peak Type	Area $\mu\text{S}^*\text{min}$	Height μS	Amount mg/l
1	3,62	lithium	M	0,001	0,005	0,0010
2	4,23	sodium	M	3,373	18,001	12,0649
3	5,62	potassium	Rd	0,806	3,196	4,8004
4	9,42	magnesium	M	0,213	0,484	0,4221
5	11,57	calcium	M	0,507	0,945	1,6160
TOTAL:				4,90	22,83	18,70



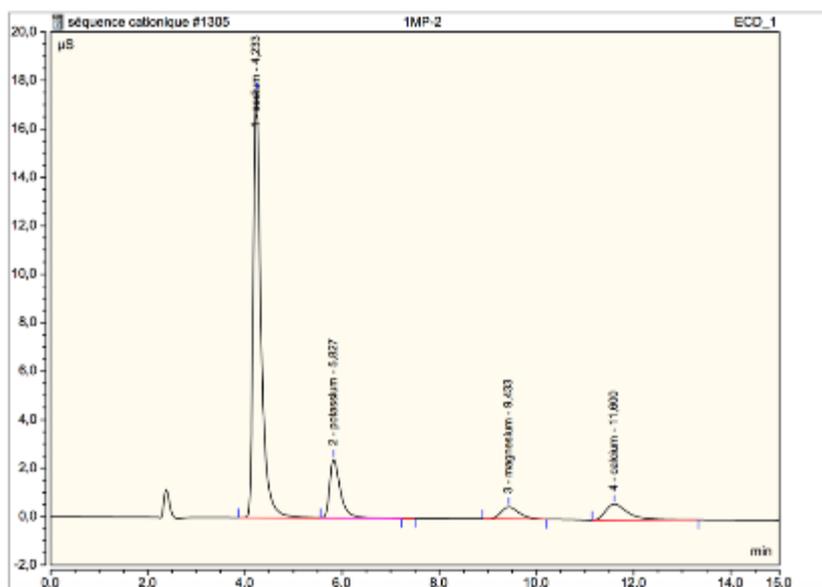
Annexe K.10 : Variété Safari à l'état frais.

No.	Time min	Peak Name	Peak Type	Area $\mu\text{S}^*\text{min}$	Height μS	Amount mg/l
1	3,81	lithium	BMB	0,001	0,004	0,0008
2	4,22	sodium	BM	3,755	19,800	13,4279
3	5,81	potassium	MB	1,042	4,067	5,8353
4	9,41	magnesium	BMB	0,271	0,610	0,5374
5	11,56	calcium	BMB	0,665	1,244	2,1200
TOTAL:				5,73	25,75	22,02



Annexe K.11 : Variété Gandiol F1 à l'état frais.

No.	Time min	Peak Name	Peak Type	Area $\mu\text{S}^*\text{min}$	Height μS	Amount mg/l
1	4,23	sodium	M	3,285	17,583	11,7479
2	5,83	potassium	Rd	0,615	2,420	3,5043
3	8,43	magnesium	M	0,218	0,497	0,4321
4	11,60	calcium	M	0,356	0,656	1,1370
TOTAL:				4,47	21,18	16,82



Annexe K.12 : Variété Orient F1 à l'état frais.

No.	Time min	Peak Name	Peak Type	Area $\mu\text{S}^*\text{min}$	Height μS	Amount mg/l
1	4,23	sodium	M	3,835	20,576	13,7148
2	5,82	potassium	Rd	0,838	3,323	4,7753
3	8,41	magnesium	M	0,234	0,529	0,4629
4	11,57	calcium	M	0,402	0,745	1,2623
TOTAL:				5,31	25,17	20,24

