

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par :

HAMIZI Yassine et BELKHATIR Zakarya

Sujet

Modélisation du séchage des aliments dans un séchoir à air chaud

Soutenu publiquement, le 23 / 06 / 2026, devant le jury composé de :

M.GUELIL Hocine	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M.BENMANSOUR Abdelkrim	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur
M.YOUSFI Sidi Mohammed	MCB	Univ. Tlemcen	Encadrant

Année universitaire : 2025/2026

Dédicace

Grâce à dieu tout puissant, Je dédie ce travail :

*À mes très chers parents, pour leur amour, leurs sacrifices,
leurs prières et leur soutien constant tout au long de mon
parcours.*

*À mon épouse, pour sa patience, son soutien moral et ses
encouragements durant toute la période de réalisation de ce
mémoire.*

*À mes chers enfants, ma fille Darine et mon fils Mohammed
qui ont été une source de motivation, de joie et de courage
dans les moments difficiles.*

A toutes ma famille et mes très chers frères

Hamizi yassine

Dédicace

Je dédie ce travail à :

À mes chers parents, en témoignage de ma profonde reconnaissance pour leurs sacrifices, leur amour, leurs prières et leur soutien inconditionnel tout au long de mon parcours.

À mes frères, pour leur soutien moral, leur encouragement et leur présence à mes côtés durant toutes les étapes de mon parcours.

Belkhatir Zakarya

Remerciements

Au nom d'Allah, le Tout-Puissant, le Clément et le Miséricordieux, je tiens avant tout à Le remercier de m'avoir accordé la santé, la patience, la force et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, **M. Yousfi Sidi Mohammed**, Maître de Conférences B à l'Université de Tlemcen, pour son encadrement, sa disponibilité, ses précieux conseils, ses orientations pertinentes ainsi que son soutien constant tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

Mes sincères remerciements s'adressent également aux membres du jury :

- **M. Guellil Houcine**, Maître de Conférences à l'Université de Tlemcen, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de soutenance.*

- **M. Benmansour Abdelkrim**, Maître de Conférences à l'Université de Tlemcen, pour l'intérêt porté à ce travail en acceptant de l'examiner ainsi que pour ses remarques et suggestions constructives.*

J'adresse également mes remerciements à l'ensemble des enseignants du Département de Mécanique Énergétique de l'Université de Tlemcen pour la qualité de la formation qu'ils m'ont dispensée et pour les connaissances qu'ils m'ont transmises tout au long de mon parcours universitaire.

Résumé

Ce travail présente une étude numérique du séchage convectif de la pomme de terre dans un séchoir à air chaud à l'aide de la mécanique des fluides numérique (CFD). La géométrie du séchoir a été réalisée sous GAMBIT 2.3.16 , et les simulations ont été effectuées avec ANSYS Fluent 6.3.26 en utilisant les équations de continuité, de Navier–Stokes, d'énergie ainsi que le modèle Species Transport. Les échantillons de pomme de terre ont été modélisés comme un milieu fluide poreux (Porous Zone). L'influence de la vitesse, de la température et de l'humidité de l'air, ainsi que de la position des échantillons et de la géométrie du séchoir, a été analysée. Les distributions de vitesse, de température et de la fraction massique d'eau ont permis d'évaluer la cinétique de séchage et l'homogénéité du procédé. Les résultats montrent que l'augmentation de la température et de la vitesse de l'air améliore le séchage, tandis qu'une humidité élevée le ralentit.

Bien que les valeurs numériques obtenues diffèrent des résultats expérimentaux en raison des hypothèses simplificatrices du modèle, cette étude met en évidence l'intérêt de la CFD comme outil d'analyse et d'optimisation des séchoirs convectifs à air chaud.

Mots-clés : Séchage convectif, CFD, ANSYS Fluent, GAMBIT , pomme de terre, Species Transport, Porous Zone.

الملخص

يتناول هذا العمل دراسةً عدديةً لعملية التجفيف بالحمل الحراري لشرائح البطاطا داخل مجفف يعمل بالهواء الساخن ، وأنجزت **GAMBIT 2.3.16** تم إنشاء هندسة المجفف باستعمال برنامج **(CFD)** باستخدام ديناميكا الموائع الحسابية بالاعتماد على معادلات الاستمرارية، ونافير-ستوكس، والطاقة، **ANSYS Fluent 6.3.26** المحاكاة العددية باستخدام لمحاكاة انتقال الرطوبة. وقد مُثِّلَت عينات البطاطا كوسط مسامي مائع **Species Transport** بالإضافة إلى نموذج لتمثيل انتقال الحرارة والكتلة داخل المنتج **(Porous Zone)**

ركزت الدراسة على تحليل تأثير أهم العوامل التشغيلية، والمتمثلة في سرعة الهواء الساخن، ودرجة حرارته، ورطوبته، بالإضافة إلى تأثير موضع العينات داخل المجفف وهندسته، على حركية التجفيف وتجانس توزيع الحرارة والرطوبة. وقد تم الاعتماد على توزيعات السرعة ودرجة الحرارة والكسر الكتلي للماء لتقييم أداء عملية التجفيف

أظهرت النتائج أن زيادة درجة حرارة الهواء وسرعته تؤدي إلى تحسين انتقال الحرارة وتسريع عملية التجفيف، في حين أن ارتفاع رطوبة الهواء يحد من معدل التبخر ويؤدي إلى إبطاء التجفيف. ورغم وجود اختلاف بين النتائج العددية والنتائج التجريبية نتيجة الفرضيات التبسيطية المعتمدة في النموذج، فقد بينت الدراسة أن ديناميكا الموائع الحسابية تمثل أداة فعالة لتحليل وتحسين أداء المجففات بالحمل الحراري، كما توفر فهماً أفضل لتوزيع الهواء وانتقال **(CFD)** الحرارة والكتلة داخل غرفة التجفيف

، **ANSYS Fluent** ، **(CFD)** التجفيف بالحمل الحراري، البطاطا، ديناميكا الموائع الحسابية: **الكلمات المفتاحية**
(Porous Zone) ، الوسط المسامي **Species Transport**، انتقال الحرارة، انتقال الكتلة، نموذج **GAMBIT**

Abstract

This work presents a numerical study of the convective drying of potato slices in a hot-air dryer using Computational Fluid Dynamics (CFD). The dryer geometry was created using GAMBIT 2.3.16, and the simulations were carried out with ANSYS Fluent 6.3.26 by solving the continuity, Navier–Stokes, energy, and Species Transport equations. The potato samples were modeled as a porous fluid medium (Porous Zone). The effects of air velocity, air temperature, air humidity, sample position, and dryer geometry on the drying process were investigated. The distributions of air velocity, temperature, and water mass fraction were analyzed to evaluate the drying kinetics and drying uniformity. The results indicate that increasing the air temperature and velocity enhances the drying process, whereas higher air humidity slows it down. Although the numerical results differ from experimental data due to the simplifying assumptions adopted in the model, this study demonstrates the potential of CFD as an effective tool for the analysis and optimization of hot-air convective dryers.

Keywords: Convective drying, Potato, Computational Fluid Dynamics (CFD), ANSYS Fluent, GAMBIT, Species Transport, Porous Zone.

Liste des figures

chapiter I

Figure I 1: Principe du séchage par conduction	5
Figure I 2 : Mécanisme de conduction	6
Figure I 3: Séchoir à palettes	6
Figure I 4 : Mécanisme de convection	7
Figure I 5: Schéma du séchoir tambour rotatif	7
Figure I 6 : Séchoir à tambour rotatif.....	8
Figure I 7: Schéma de séchoir à plateaux.....	8
Figure I 8: Le séchoir à plateaux.....	9
Figure I 9 : Schéma du séchoir tunnel.....	9
Figure I 10: Séchoir à tunnel.....	10
Figure I 11: Schéma d'un séchoir à four micro-ondes	10
Figure I 12: Lyophilisateur.....	11
Figure I 13: Séchage à l'infrarouge	11
Figure I 14: Etuve solaire	12
Figure I 15: Séchoir solaire direct	12
Figure I 16: Séchage à l'air chaud contre séchage IR.....	13

chapiter II

Figure II 1:(a) présente le séchoir convectif conventionnel (b) schéma de principe	18
Figure II 2: Diagramme psychrométrique de l'air humide démonstratif	25
Figure II 3 : Courbe théorique de Krischer	26
Figure II 4: Schéma d'un solide humide.....	28
Figure II 5:Différents types d'eau dans le grain [31]	30
Figure II 6:Forme générale des isothermes de Pillard, 1997 et Jannot, 2003	33
Figure II 7 : Isothermes de sorption (modèles BET(a)et(b) et GAB (c)).....	33

Chapitre III

Figure III 1:. Principe de la méthode des volumes finis (adapté de Versteeg et Malalasekera [1])	46
Figure III 2:SECHOIR DE EXPERIANCE	47
Figure III 3:Vue globale de GAMBIT.....	48
Figure III 4::définir la géométrie de séchoir sur gambit 2.3.16	49
Figure III 5 le maillage de séchoir	50
Figure III 6 : Le maillage d'un produit	51
Figure III 7: Le maillage de l'antre et sortie d'air.....	51
Figure 8:Choix du solveur.....	53

Figure III 9:energy.....	54
Figure III 10 :choix viscos Model.....	54
Figure III 11:Transport d'espèces	55
Figure III 12:Itirations de sumelation.....	56
Figure III 13 : (a) définition les zones ; (b) : entries l'unités ; (c) : vérifie les unités.....	57
Figure III 14:les Matériaux	58
Figure III 16:ourlet paramètre	59
Figure III 17 Perméabilité	61
Figure III 18 ; line surface.....	62
Figure III 19 : l'initialisation.	63
Figure III 20:patch.....	63
Figure III 21: solutions contrôlées	64
Figure III 22 : Résultat attendu	65

Chapitre IV

Figure IV 1:Schéma du cadre de développement et de couplage du modèle CFD de séchage	70
Figure IV 2: Évolution de la fraction massique moyenne d'eau dans la pomme de terre au cours du séchage convectif.....	70
Figure IV 3: Comparaison de l'évolution de la fraction massique moyenne d'eau de la pomme de terre.....	71
Figure IV 4: Distribution des vecteurs de vitesse et du champ de température dans la chambre de séchage pour différentes températures de l'air (40, 50 et 60 °C) à une vitesse d'entrée de 0,5 m/s après 15,3 min de séchage.	72
Figure IV 5: influence de la température de l'air chaud sur la qualité finale du produit	73
Figure IV 6: Évolution couplée de la teneur en eau et de la température pendant le séchage .	74
Figure IV 7: Distribution des lignes de vitesse à 60°C courant et zones de recirculation de l'air chaud dans le séchoir Résultats Fluent après 15.3 min	75
Figure IV 8: Distribution des vecteurs de vitesse colorés par la température statique pour différentes vitesses d'entrée de l'air (0,5 ; 1 et 2 m/s) à 60 °C après 15,3 min de séchage.....	76
Figure IV 9 : Évolution de la vitesse de l'air le long des lignes de mesure supérieure (Ligne 1), médiane (Ligne 2) et inférieure (Ligne 3) pour différentes vitesses d'entrée (0,5 ; 1 et 2 m/s) après 15,3 min de simulation.....	77
Figure IV 10: Influence de la vitesse d'entrée sur l'état final du produit	78
Figure IV 11: Évolution temporelle de la fraction massique d'eau dans l'échantillon de pomme de terre durant les 20 minutes de séchage (analyse de convergence).....	79
Figure IV 12: Evaluation de température à partir a la position	79
Figure IV 13: la position des échantillons dans le séchoir	80
Figure IV 14: Distribution de l'Energy dans le séchoir	81
Figure IV 15: Comparaison de la fraction massique d'eau (H ₂ O) pour(a) 0.0001 et(b) 0.0212 kg/kg sec de séchage	83

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau II 1: Principaux modèles d'isothermes de sorption	32
---	----

chapiter II

Tableau II 1: Principaux modèles d'isothermes de sorption	32
---	----

Chapitre III

Tableau III 2 : Paramètres du milieu poreux pour les tranches de pommes de terre (5×1 cm)	60
Tableau III 3: Conditions initiales et paramètres de simulation du séchage (pomme de terre)	61
Tableau III 4 : Ligne Point	62
Tableau III 5 Cas de simulation vitesse et température.....	65

Chapitre IV

Tableau IV1: Conditions de simulation pour les deux cas étudiés.....	82
--	----

Nomenclature

Symbole	Description	Unité SI
ρ	Masse volumique de l'air	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ϕ	Variable transportée	Dépend de la grandeur
t	Temps	s
u	Vecteur vitesse de l'air	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
u_i, u_j	Composantes du vecteur vitesse	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
x_i, x_j	Coordonnées spatiales	m
p	Pression statique	Pa
μ	Viscosité dynamique	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (Pa·s)
μ_t	Viscosité turbulente	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (Pa·s)
Γ	Coefficient de diffusion	Dépend de la grandeur
S_ϕ	Terme source associé à la variable transportée	Dépend de la grandeur
F	Force volumique	$\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$
g	Accélération de la pesanteur	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
T	Température	K
C_p	Capacité thermique massique à pression constante	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
k_{eff}	Conductivité thermique effective	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$\dot{m}_{evap}$	Taux d'évaporation	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
L_v	Chaleur latente de vaporisation	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
Y	Fraction massique de vapeur d'eau	Sans dimension
D_{eff}	Coefficient de diffusion effectif de la vapeur d'eau	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
S_m	Terme source de masse lié à l'évaporation	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
k	Énergie cinétique turbulente	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
G_k	Taux de production de l'énergie cinétique turbulente	$\text{Kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$
C_μ	Constante du modèle $k - \varepsilon$	Sans dimension
$C_{1\varepsilon}$	Première constante du modèle $k - \varepsilon$	Sans dimension
$C_{2\varepsilon}$	Deuxième constante du modèle $k - \varepsilon$	Sans dimension
σ_k	Nombre de Prandtl turbulent pour k	Sans dimension
σ_ε	Nombre de Prandtl turbulent pour ε	Sans dimension
∇	Opérateur gradient	—
$\nabla \cdot$	Opérateur divergence	—
∇^2	Opérateur laplacien	—
$m_{produit}$	Masse du produit sec	Kg
X_i, X_f	Teneur en humidité initiale et finale	Kg eau/kg matière sèche
$\dot{m}_{air}$	Débit massique d'air	(Kg/s)
Y_{in}, Y_{out}	Humidité absolue de l'air	Kg eau/kg air sec)
η	Rendement énergétique	%
$k:$	Constante de séchage	—
M	Humidité moyenne	—
M_e	Humidité d'équilibre	—
Pr	Le nombre de Prandtl	—
k est	La conductivité thermique	(W/m·K)
Re	Le nombre de Reynolds,	—
D	Le coefficient de diffusion	m^2/s
Sc	Le nombre de Schmidt,	—
L	La longueur caractéristique	(m),
CFD	Computational Fluid Dynamics	—

Le sommaire

Résumé	I
المخلص	II
Abstract	III
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	VI
Nomenclature.....	VII
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur le séchage	2
I.1 Introduction.....	3
I.2 Principes du séchage.....	3
I.2.1 Définition générale.....	3
I.2.2 Objectifs du séchage	4
I.3 Différentes méthodes de séchage	4
I.3.1 Séchage mécanique	4
I.3.2 Séchage chimique.....	4
I.3.3 Séchage thermique.....	4
I.4 Différents modes de séchage	5
I.4.1 Séchage par conduction.....	5
I.4.2 Séchage par convection	7
I.4.3 Séchage par rayonnement.....	10
I.5 Comparaison entre le séchage à l'air chaud et le séchage infrarouge.....	13
I.6 Conclusion	13
Références bibliographiques chapitre I.....	14
Chapitre II : Modélisation mathématique	15
II.1 Revue bibliographique et état de l'art sur le séchage convectif et la modélisation CFD.....	16
II.2 Description du séchoir convectif et modèle géométrique 3D	17
II.3 Géométrie de la chambre de séchage.....	19

II.4 Équations gouvernantes.....	19
II.4.1 Équation générale de transport	19
II.4.2 Équation de continuité.....	19
II.4.3 Équations de Navier–Stokes.....	20
II.4.4 Équation de l'énergie	20
II.4.5 Modèle de turbulence $k - \varepsilon$	20
II.4.6 Transport de l'humidité	20
II.4.7 Coefficients de transfert de chaleur et de masse	21
II.5 Grandeurs psychrométriques de l'air humide.....	21
II.5.1 Humidité absolue :	21
II.5.2 Humidité relative :	21
II.5.3 Taux de saturation.....	22
II.5.4 Températures caractéristiques	22
II.5.5 Volume spécifique.....	22
II.5.6 Masse volumique de l'air humide	23
II.5.7 Mélange de deux airs humides	24
II.6 Cinétique du séchage.....	25
II.7 Formes de l'eau dans les produits :	28
II.8 Activité de l'eau et humidité relative d'équilibre	30
II.8.1 Importance de l'activité de l'eau	31
II.9 Modèles théoriques des isothermes de sorption	31
II.10 Bilans énergétique et de masse du séchage	34
II.10.1 Le bilan énergétique :.....	34
II.10.2 Bilan de masse :	35
II.10.3 Transferts couplés de chaleur et de masse	37
II.11 Facteurs influençant le séchage :	38
II.11.1 Température de l'air :	38
II.11.2 Humidité relative de l'air :	38
II.11.3 Vitesse de l'air :.....	39
II.11.4 Propriétés du produit :.....	39
II.11.5 Surface d'échange :	39
II.11.6 Pression et conditions ambiantes :	39

II.11.7 Mode de séchage :	39
Conclusion du Chapitre II	39
Références bibliographiques chapitre II	41
Chapitre III : Description du système et modélisation numérique	44
III.1 Introduction.....	45
III.2 Méthode des volumes finis	45
III.3 Introduction à la simulation du séchage	46
III.3.2 Outils de simulation : Gambit et Fluent	47
III.4 Procédure de résolution sous ANSYS Fluent 6.3.26	52
III.4.2 Choix du solveur	52
III.4.3 Activation des modèles physiques	53
III.4.4 Procédure itérative de résolution	56
III.4.5 Critères de convergence	56
III.5 Importer le mailing & définition des zones.	57
III.6 Conditions aux limites (BC).....	58
III.6.1 Condition aux limites du transfert de masse.....	58
III.6.2 Condition à l'entrée	59
III.6.3 Condition aux limites à la sortie	59
III.6.4 Conditions aux parois.....	59
III.6.5 Définition du matériau et modélisation de la pomme de terre	60
III.7 Initial Condition.....	61
III.8 Définition des lignes de surveillance pour le suivi de la température	62
III.9 Choix des facteurs de sous relaxation et de Résidu et l'initialisation	63
III.10.1. Pas de temps et nombre de Courant (CFL)	64
III.10.2 Calcul de la teneur en humidité (moisture content)	64
III.10.3 Résultat attendu	65
III.11 d'expériences paramétriques (vitesse – température)	65
Conclusion.....	66
Références bibliographiques de chapitre III	67
Chapitre IV : Résultats et discussion.....	68
IV.1 : Introduction	69
IV. 2 : Cadre de simulation	69

IV.3 Validation du modèle	70
IV.4 Effet de la température de l'air de séchage.	72
IV4.1 Effet de la température de l'air	72
IV4.2 Influence de la température d'entrée sur l'état final du produit	73
IV4.3 Évolution couplée de la teneur en eau et de la température pendant le séchage	74
IV.4.3 Conclusion 1	75
IV.5 Effet de la vitesse	75
IV.5.1 Influence de la vitesse de l'air sur l'écoulement	75
IV.5. 2 Influence de la vitesse de l'air sur le champ thermique et l'écoulement.	76
IV.5.3 Influence de la vitesse d'entrée sur les profils de vitesse le long des lignes de mesure.....	77
IV.5.4 Influence de la vitesse d'entrée sur l'état final du produit	78
IV.5.5 Conclusion 2	79
IV.6 Importance de la position des échantillons dans le séchoir	79
IV.6.1 Conclusion	81
IV.7 Influence de la géométrie du séchoir sur les pertes énergétiques	81
IV.7.1 Conclusion 3	82
IV.8 Effet de la teneur en humidité de l'air sur le processus de séchage	82
IV.8.1 Conclusion 4	83
Conclusion générale	84
Références bibliographiques chapitre VI et conclusion	86

Introduction générale

Le séchage constitue l'une des opérations unitaires les plus importantes dans l'industrie agroalimentaire et dans de nombreux procédés industriels. Il consiste à éliminer une partie de l'eau contenue dans un produit afin de réduire sa teneur en humidité et d'améliorer sa stabilité pendant le stockage. La réduction de la teneur en eau permet de limiter le développement des micro-organismes responsables de la détérioration des aliments, de ralentir les réactions enzymatiques et chimiques et ainsi de prolonger la durée de conservation des produits alimentaires (1).

L'importance de l'eau dans les organismes vivants est également soulignée dans le Saint Coran: « **Et Nous avons fait de l'eau toute chose vivante** » (Sourate Al-Anbiya, verset 30). Cette citation met en évidence le rôle fondamental de l'eau dans la vie et explique pourquoi le contrôle de la teneur en eau constitue un élément essentiel dans les procédés de conservation des aliments.

Dans le domaine agroalimentaire, le séchage joue un rôle déterminant dans la valorisation des produits agricoles et dans la réduction des pertes post-récolte. Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), environ **1,3 milliard de tonnes de denrées alimentaires sont perdues chaque année dans le monde**, ce qui représente près d'un tiers de la production alimentaire mondiale (2).

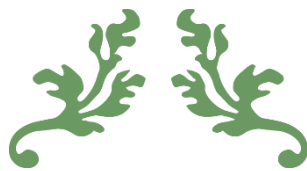
Les produits agricoles tels que les fruits, les légumes et les céréales contiennent généralement une teneur en eau élevée pouvant atteindre **70 % à 95 % de leur masse totale**, ce qui les rend particulièrement sensibles à la détérioration biologique et chimique. Le séchage permet donc de réduire l'activité de l'eau et d'augmenter considérablement la durée de conservation des produits alimentaires (3).

Bien que le séchage naturel au soleil soit utilisé depuis des milliers d'années, les exigences actuelles en matière de qualité, d'hygiène et de productivité ont conduit au développement des séchoirs convectifs à air chaud.

Ces systèmes utilisent un écoulement d'air chauffé pour transférer de la chaleur au produit et favoriser l'évaporation de l'humidité. La performance du procédé dépend principalement de la température de l'air, de sa vitesse d'écoulement et de son humidité relative. Le séchage convectif à air chaud présente plusieurs avantages, notamment la réduction du temps de séchage, l'amélioration de l'uniformité du produit final et la possibilité de contrôler précisément les conditions opératoires.

C'est pour ces raisons qu'il constitue aujourd'hui la technologie de séchage la plus répandue dans les applications industrielles et agroalimentaires.

Dans ce contexte, le recours à des modèles numériques, en particulier la méthode des volumes finis, constitue un outil performant pour simuler et analyser le processus de séchage. Ces modèles permettent de prédire l'évolution spatio-temporelle de la température et de la teneur en eau, contribuant ainsi à l'optimisation des conditions opératoires (2)



Chapitre I : Généralité sur le séchage



I.1 Introduction

Le séchage constitue une opération unitaire essentielle largement utilisée dans les industries agroalimentaires, pharmaceutiques et chimiques. Il consiste à éliminer l'humidité contenue dans un produit solide par évaporation, sous l'effet combiné d'un apport de chaleur et d'un écoulement d'air [1].

Dans le domaine agroalimentaire, le séchage joue un rôle primordial dans la conservation des produits en réduisant leur activité de l'eau, ce qui permet de limiter significativement le développement des micro-organismes ainsi que les réactions biochimiques de dégradation [2,3].

Le processus de séchage repose sur deux phénomènes fondamentaux couplés : le transfert de chaleur, qui fournit l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau, et le transfert de masse, qui assure la migration de l'humidité depuis l'intérieur du produit vers sa surface, puis vers l'environnement extérieur.

Dans le cas des produits alimentaires tels que la pomme de terre, le séchage est généralement dominé par une phase de diffusion interne, caractérisée par un déplacement progressif de l'humidité du cœur du matériau vers la surface. Cette phase devient prédominante après une courte période initiale, rendant le processus globalement contrôlé par la diffusion [2].

Plusieurs paramètres influencent la cinétique de séchage, notamment la température de l'air, la vitesse de l'écoulement, l'humidité relative ainsi que les propriétés physiques et structurales du produit, telles que l'épaisseur, la porosité et la diffusivité effective.

Dans ce contexte, le recours à des modèles numériques, en particulier la méthode des volumes finis, constitue un outil performant pour simuler et analyser le processus de séchage. Ces modèles permettent de prédire l'évolution spatio-temporelle de la température et de la teneur en eau, contribuant ainsi à l'optimisation des conditions opératoires [3].

I.2 Principes du séchage

I.2.1 Définition générale

Le **séchage** est une opération unitaire de séparation thermique dont l'objectif est l'élimination partielle ou totale de l'eau (ou plus rarement d'un autre liquide) contenue dans un produit solide, semi-solide ou liquide, par vaporisation sous l'effet d'un apport de chaleur, afin d'obtenir un produit stable dans le temps [4].

Du point de vue thermodynamique, le séchage est un processus de transfert couplé de **chaleur** et de **matière** :

- **Transfert de chaleur** : L'énergie thermique est apportée au produit (par convection, conduction, rayonnement ou combinaison) pour fournir la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

- **Transfert de matière** : L'eau vaporisée migre de l'intérieur du produit vers sa surface, puis est évacuée par un courant gazeux (généralement de l'air).[4]

Le séchage s'arrête lorsque l'équilibre thermodynamique est atteint entre la pression partielle de vapeur d'eau à la surface du produit et la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air ambiant.

I.2.2 Objectifs du séchage

- Le séchage a pour objectif principal de réduire la teneur en eau des produits afin d'assurer leur conservation sur une longue durée. En diminuant l'activité de l'eau, il limite le développement des micro-organismes et ralentit les réactions enzymatiques et chimiques responsables de la détérioration des aliments. [5]
- Un autre objectif important du séchage est la réduction de la masse et du volume des produits, ce qui facilite leur stockage, leur transport et leur distribution. Cette réduction permet également d'optimiser les coûts logistiques dans les chaînes agroalimentaires. [6]
- Le séchage vise également à améliorer la stabilité physique et chimique des produits, tout en conservant au mieux leurs qualités nutritionnelles et organoleptiques. Lorsqu'il est correctement contrôlé, il permet de maintenir la qualité du produit final en termes de texture, de couleur et de goût.
- Enfin, le séchage constitue un moyen de valorisation des produits agricoles, notamment en permettant la transformation des matières premières en produits dérivés tels que les poudres, les flocons ou les produits déshydratés utilisés dans diverses applications industrielles. [6]

I.3 Différentes méthodes de séchage

Le séchage est une opération unitaire visant à éliminer l'humidité d'un matériau par des mécanismes de transfert de masse et de chaleur. [7]

I.3.1 Séchage mécanique

Le séchage mécanique consiste à éliminer l'eau par des forces physiques (pressage, centrifugation, filtration), sans changement d'état. Il est utilisé comme prétraitement pour réduire l'eau libre et la consommation énergétique, mais reste limité à l'eau non liée. [8]

I.3.2 Séchage chimique

Le séchage chimique utilise des agents déshydratants (CaCl_2 , solutions salines ou sucrées) créant un gradient de potentiel chimique favorisant l'extraction de l'eau. Il est efficace pour préserver la qualité des produits, mais peut modifier leur composition et influencer la diffusivité interne selon des études doctorales. [9]

I.3.3 Séchage thermique

Le séchage thermique repose sur un apport de chaleur provoquant l'évaporation de l'eau et son transfert vers le milieu extérieur [8]. Il comprend une phase à vitesse constante suivie

d'une phase contrôlée par diffusion interne. Sa modélisation avancée, étudiée en thèse, nécessite des approches non linéaires, malgré une consommation énergétique élevée. [10]

I.4 Différents modes de séchage

L'opération de séchage peut se faire de plusieurs façons. Le critère de classification le plus utilisé repose sur le mode de transfert de chaleur entre le produit et la source de chaleur.

I.4.1 Séchage par conduction

Le produit destiné au séchage est placé en contact direct avec une surface solide chauffée où le transfert thermique se produit par interaction entre la surface de la paroi chauffée et le produit. Ce type de dessiccation est largement pratiqué dans les secteurs de l'industrie textile et de la fabrication du papier. [11]

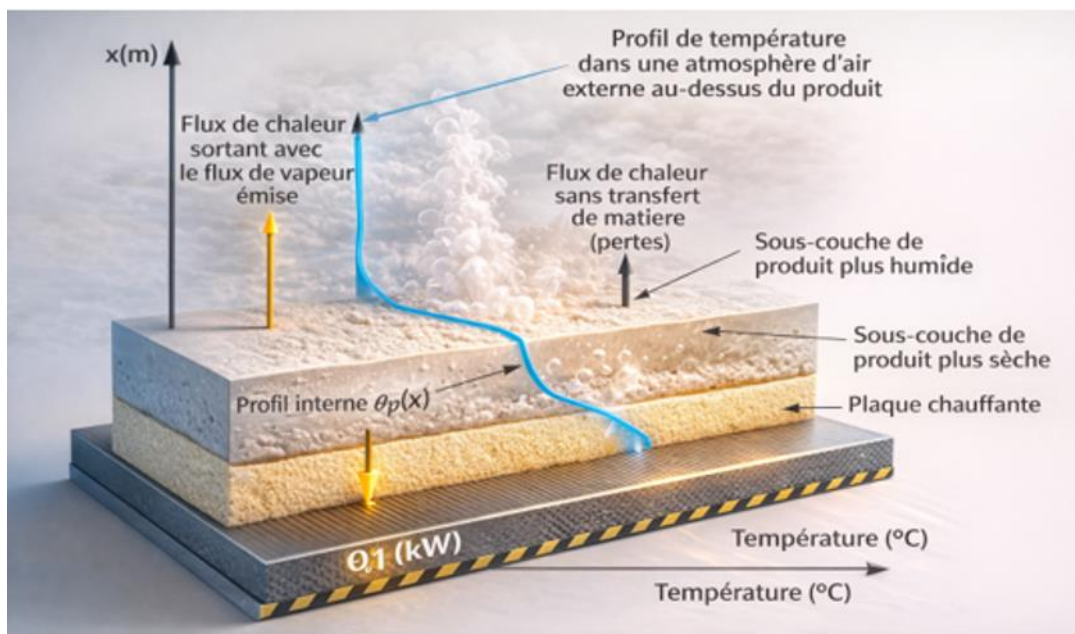


Figure I 1: Principe du séchage par conduction

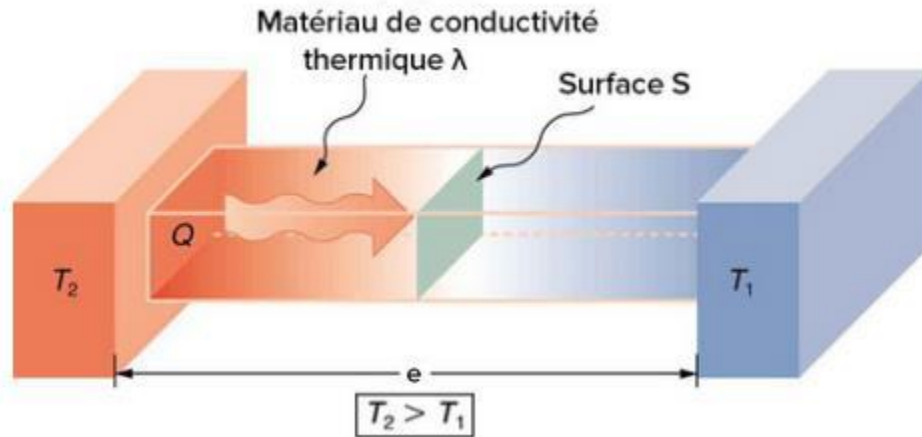
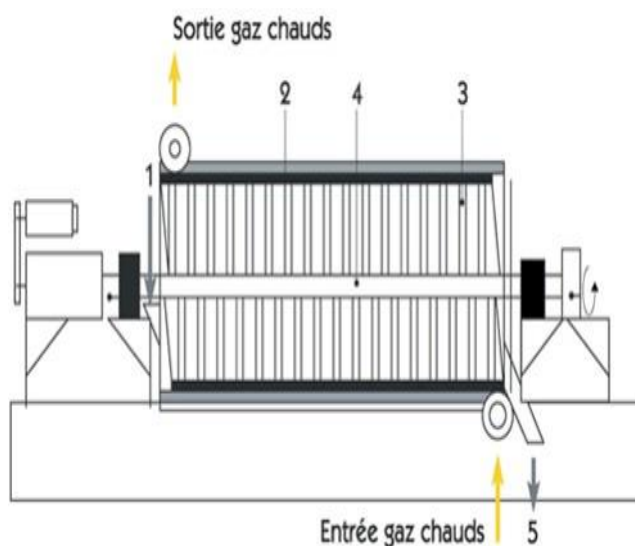


Figure I 2 : Mécanisme de conduction

La conduction de la chaleur s'effectue à travers n'importe quel matériau. Cet exemple de la figure I.2 illustre le transfert thermique à travers une barre rectangulaire.

a) Séchoir à palette/vis

Le séchoir à vis sous vide est un équipement de séchage indirect dans lequel le produit est chauffé par conduction thermique à travers une enveloppe chauffante et des arbres creux munis de lames en forme de vis, le tout fonctionnant sous vide. Ce système permet un séchage efficace à basse température, préservant les produits thermosensibles. [12]



- | |
|--|
| 1. Entrée du produit humide
2. Double enveloppe
3. Palette
4. Arbre creux
5. Sortie du produit sec |
|--|

Figure I 3: Séchoir à palettes

I.4.2 Séchage par convection

Un flux d'air chaud est dirigé sur le produit à sécher. Il se crée naturellement entre ce produit et l'air un écart de température et de pression partielle d'eau tel que :

Un transfert thermique de l'air vers le produit en raison de la différence de température.

Un transfert d'eau dans le sens opposé dû à la différence de concentration en eau dans l'atmosphère.

Cette méthode de séchage constitue plus de 85 % des appareils de séchage industriels. Est

Largement employée dans l'industrie agro-alimentaire. [13]



Figure I 4 : Mécanisme de convection

a) Séchoir tambour convectif

Un tambour rotatif est un équipement utilisé pour le séchage industriel des produits. Il s'agit d'un cylindre horizontal en rotation autour de son axe, dont la surface interne est chauffée pour permettre l'évaporation de l'humidité des produits qui y sont introduits. [14]

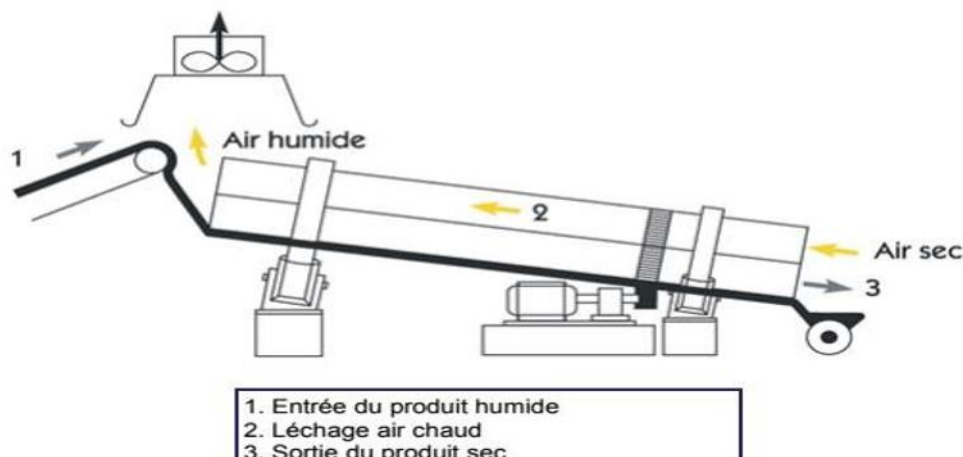


Figure I 5: Schéma du séchoir tambour rotatif



Figure I 6 : Séchoir à tambour rotatif

Le séchoir à plateaux (tray dryer) est le plus simple, où l'air chaud circule autour de produits placés sur des plateaux. Le séchoir tunnel est utilisé pour les productions continues à grande échelle, où les produits sont transportés dans un flux d'air chaud contrôlé. [15]

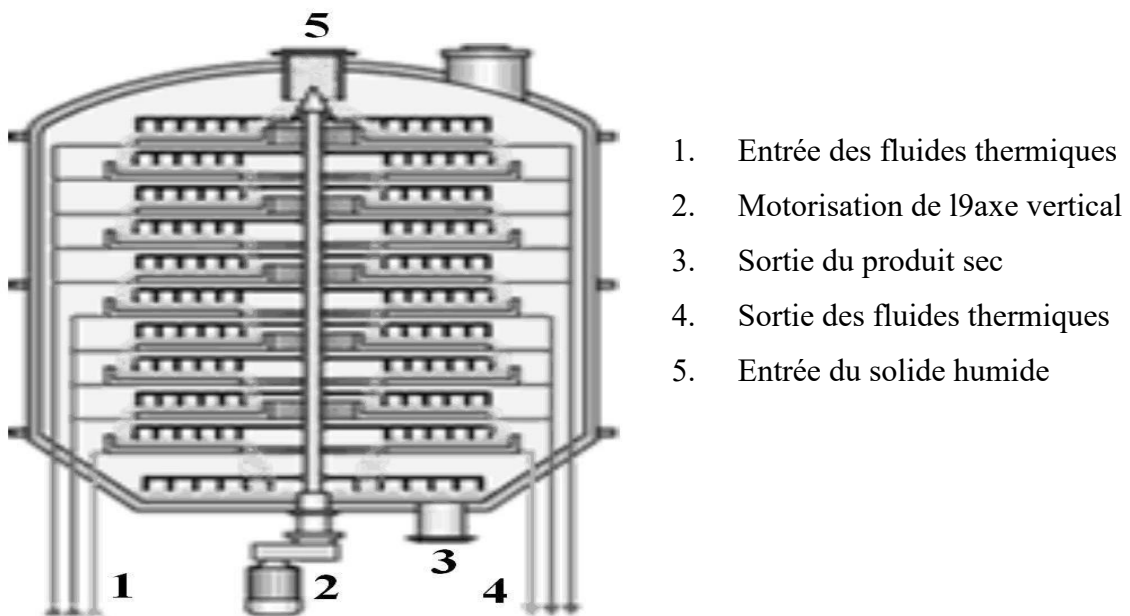


Figure I 7: Schéma de séchoir à plateaux.



Figure I 8: Le séchoir à plateaux

b) Séchoir tunnel

Le séchoir tunnel est un système de séchage continu dans lequel les produits à sécher sont placés sur des chariots ou des convoyeurs qui traversent lentement un tunnel chauffé de longueur variable [15]. L'air chaud circule à l'intérieur du tunnel, généralement à contre-courant ou à co-courant par rapport au déplacement des produits, assurant ainsi un séchage progressif et uniforme.

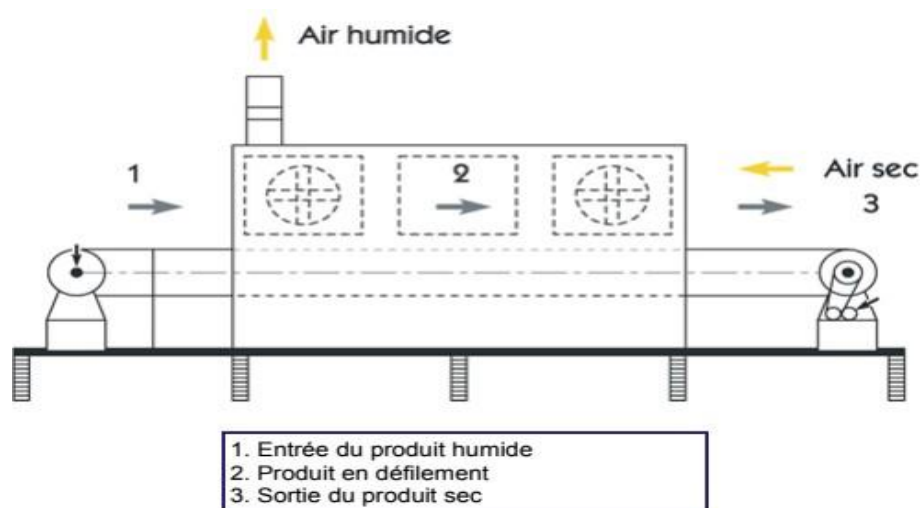


Figure I 9 : Schéma du séchoir tunnel

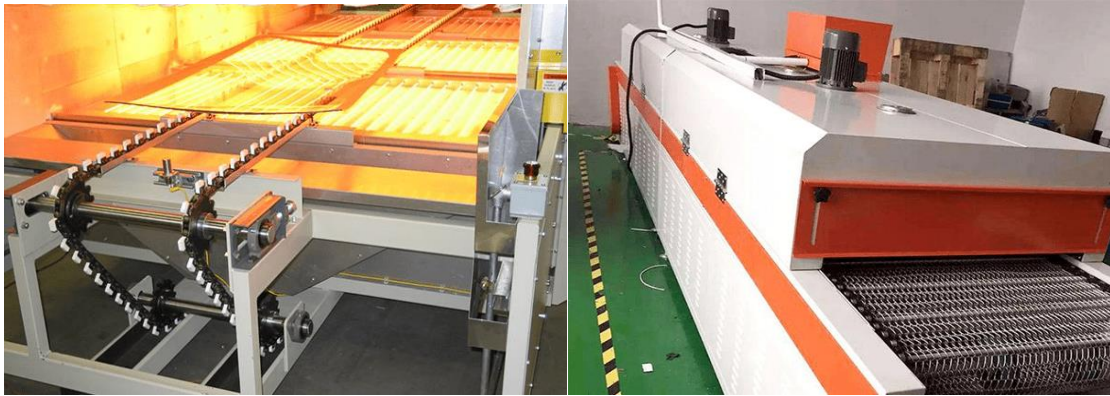


Figure I 10: Séchoir à tunnel

I.4.3 Séchage par rayonnement

On applique un rayonnement infrarouge sur le produit. Il offre un chauffage rapide des produits en couches fines ($500\mu\text{m}$). La production de radiation est réalisée soit à travers d'appareils électroniques (onde micro-ondes), soit par augmentation de la température d'un émetteur infrarouge. Ce mode est largement utilisé dans le secteur de la peinture et de la photographie. [16]

a) Séchage par micro-ondes

Les ondes pénètrent dans les matériaux et subissent une atténuation de puissance liée au transfert. Avec des micro-ondes, on peut sécher à des épaisseurs plus importantes qu'avec l'infrarouge. [16]

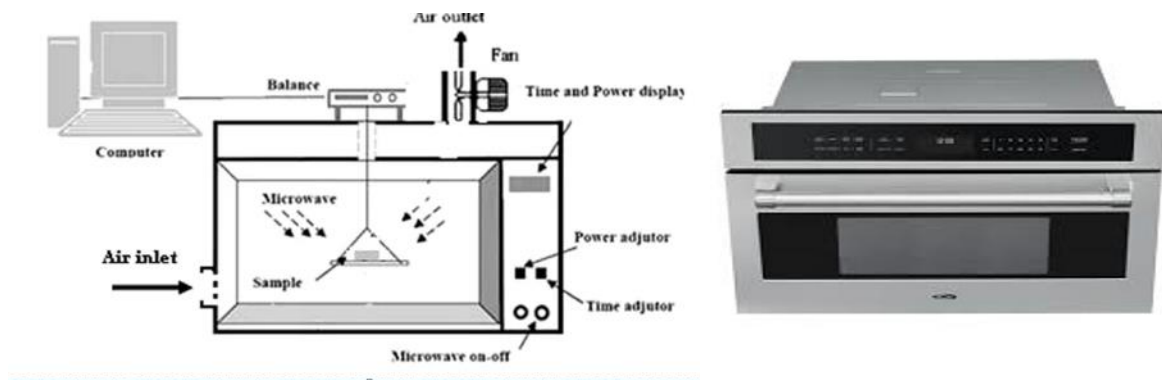


Figure I 11: Schéma d'un séchoir à four micro-ondes

b) La lyophilisation

La lyophilisation combine l'action du froid et du vide pour réaliser la sublimation de cristaux de glace c'est-à-dire un passage direct de l'état solide (glace) à l'état vapeur. Cette dernière est ensuite enlevée de la chambre de séchage par des pompes à vide mécaniques ou des éjecteurs à jet de vapeur. [17]

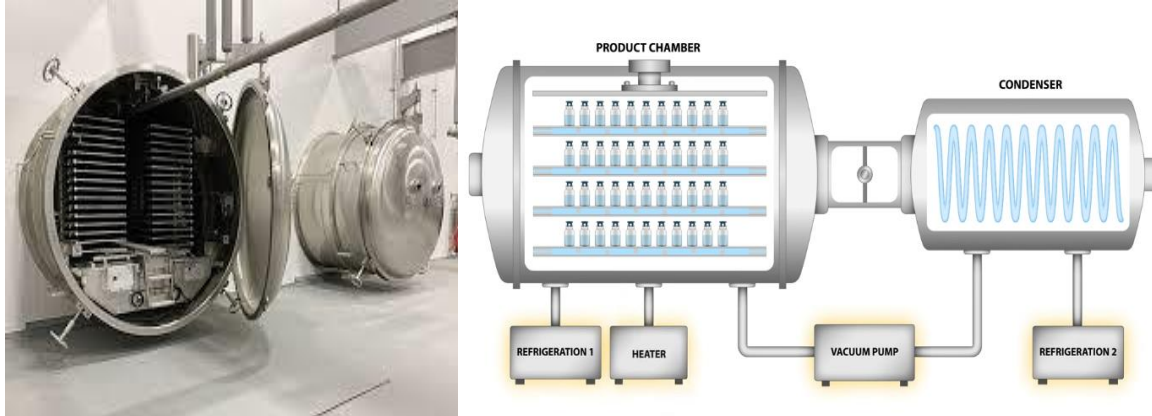


Figure I 12: Lyophilisateur

c) Le séchage par infrarouge

Le séchage par infrarouge (voir **Figure I.13**) permet d'évaporer l'eau ou le solvant à haute température. Il peut également être couplé à l'air chaud et est utilisé lorsque l'effet de séchage doit être concentré sur la surface du produit traité pour obtenir également un effet de torréfaction. Cette solution est loin d'être idéale pour les produits qui ne doivent pas être exposés à des températures élevées. [18]

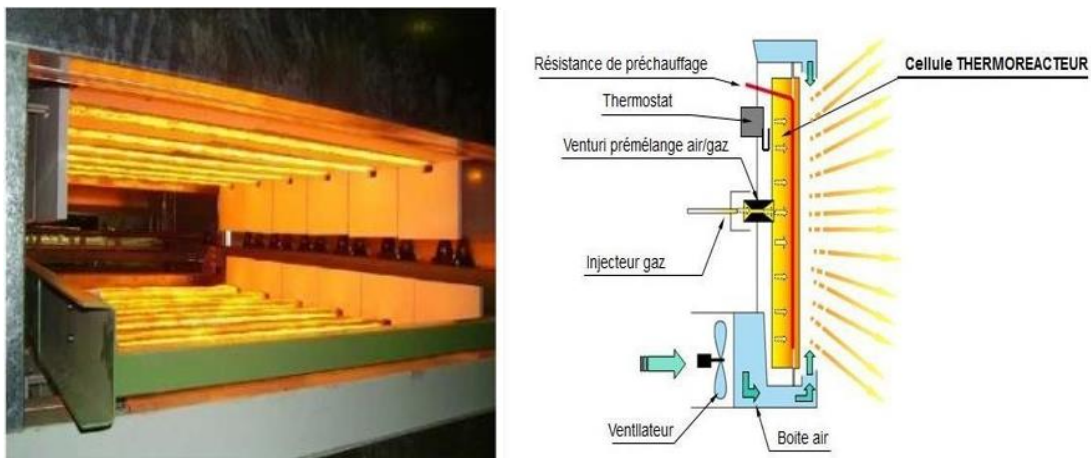


Figure I 13: Séchage à l'infrarouge

d) Séchage solaire (direct)

Il s'agit simplement de chauffer le produit par le rayonnement solaire direct (séchage direct) ou par l'intermédiaire d'un capteur solaire qui sert à capter et/ou concentrer le rayonnement solaire afin d'augmenter la température de l'air (séchage indirect). Ce mode de séchage est plus utilisé dans le domaine agro-alimentaire.

Les différents modes de séchage cités ci-dessus, à l'exception du séchage solaire, sont de grands consommateurs d'énergie (10-15 % de la consommation d'énergie industrielle mondiale). De plus, ces processus sont difficiles à réaliser notamment dans les zones rurales où l'alimentation en sources d'énergie (l'électricité, gaz...) est souvent difficile. Donc l'utilisation de l'énergie solaire gratuite est utile et permet de réduire le coût du processus notamment dans les pays en développement.



Figure I 15: Séchoir solaire direct

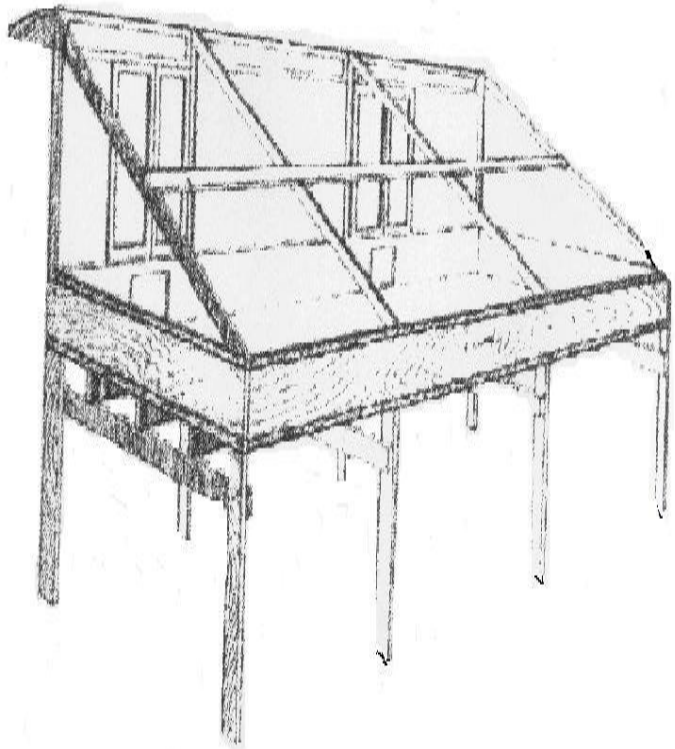


Figure I 14: Etuve solaire

I.5 Comparaison entre le séchage à l'air chaud et le séchage infrarouge

Pour le séchage et le chauffage, la infrarouge rayon (IR) offre des avantages particuliers, car il agit rapidement et à grande échelle. Le rayonnement IR pénètre directement dans le produit et génère de la chaleur de l'intérieur sans perte d'énergie. Les encres d'impression, les encres ou les revêtements peuvent ainsi être séchés ou chauffés en quelques secondes.[19]

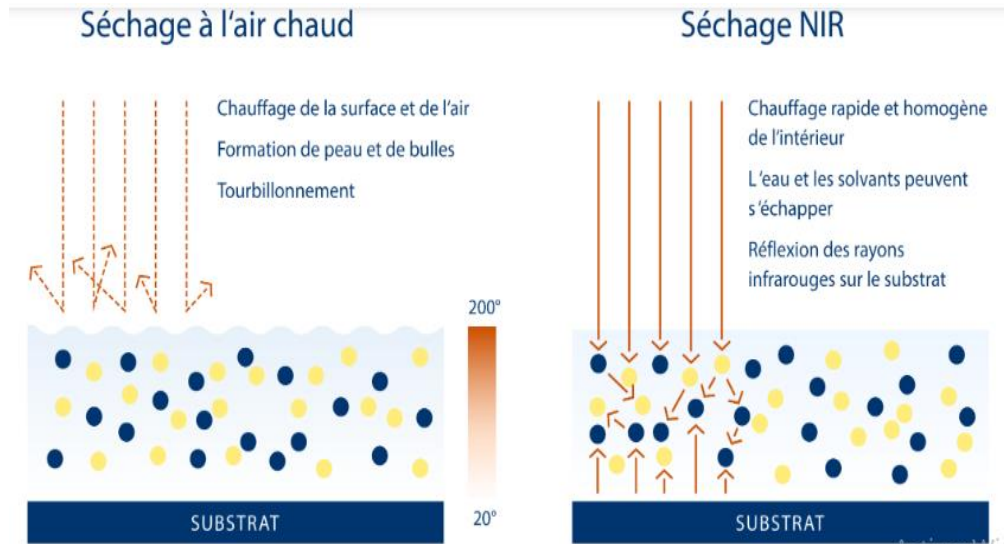


Figure I 16: Séchage à l'air chaud contre séchage IR

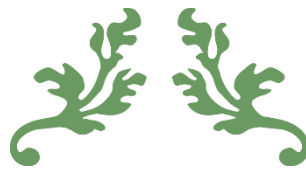
I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé le processus de séchage en définissant le séchage, les terminologies associées, les types de séchoirs ainsi que le principe d'action de chacun d'entre eux. Le séchage est un procédé thermique qui consiste à éliminer l'eau des aliments par vaporisation, ce qui permet d'inhiber le développement des micro-organismes responsables de l'altération. La maîtrise des terminologies fondamentales telles que l'humidité, le taux d'humidité, l'état de siccité, l'isotherme de sorption et le caractère hygroscopique est essentielle pour comprendre les mécanismes du séchage.

Nous avons également présenté les principaux types de séchoirs utilisés dans l'industrie agroalimentaire, notamment les séchoirs à air chaud (convectifs), les séchoirs solaires, les séchoirs à lit fluidisé, les séchoirs par atomisation, les séchoirs à tambour rotatif et les lyophilisateurs, en décrivant le principe de fonctionnement de chaque technologie. [20]

Références bibliographiques chapitre I

- [1] A.S. Mujumdar, *Drying of Foods, Vegetables and Fruits*, Volume 1, Multi-Science Publishing, 2014, pp. 1–25.
- [2] R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 2002, pp. 503–550.
- [3] Y. Jannot, G. Achour, "Heat and Mass Transfer in Drying of Porous Media", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 150–165.
- [4] A.S. Mujumdar, *Handbook of Industrial Drying*, 3rd Edition, CRC Press, 2006, pp. 3–15.
- [5] P. Fellows, *Food Processing Technology: Principles and Practice*, 3rd Edition, Woodhead Publishing, 2009, pp. 285–320.
- [6] D. Heldman, D.B. Lund, *Handbook of Food Engineering*, 2nd Edition, CRC I.3.1 Composition de l'air humide
- [7] Geankoplis C.J. *Transport Processes and Separation Process Principles*. 4th ed. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall; 2003. p. 550–580.
- [8] McCabe W.L., Smith J.C., Harriott P. *Unit Operations of Chemical Engineering*. 7th ed. New York: McGraw-Hill; 2005. p. 1020–1045.
- [9] Fellows P.J. *Food Processing Technology: Principles and Practice*. 4th ed. Cambridge: Woodhead Publishing; 2017. p. 311–330.
- [10] Karel M., Lund D.B. *Physical Principles of Food Preservation*. 2nd ed. New York: Marcel Dekker; 2003. p. 120–150.
- [11] Kouhila M. *Étude expérimentale et modélisation du séchage convectif des produits agroalimentaires*. Thèse de doctorat. Marrakech: Université Cadi Ayyad; 2002. p. 80–120.
- [12] Zogzas N.P. *Modelling of moisture diffusion during drying of food materials*. PhD Thesis. Reading (UK): University of Reading; 1996. p. 50–90.
- [13] Chouaibi M. *Modélisation du séchage des milieux poreux alimentaires*. Thèse de doctorat. Montpellier: Université de Montpellier; 2010. p. 100–150.
- [14] « Séchoirs rotatifs » . feeco.com . Feeco International Inc. Consulté le 17 février 2021 .
- [15] « Comment fonctionne un séchoir à tambour rotatif » . Ceylan Machinery . 2 février 2026.
- [16] M. Giat et M.C. Grouhel, « Problème de Séchage en Milieux Poreux. Application à un Toit de Tuiles de Terre Cuite », *Revue Générale de Thermique*, n°324, pp. 11–18, 1988.
- [17] L. Remache et A. Belhamri, « Modélisation du séchage par convection », *Revue des Énergies Renouvelables*, CISM'08, Oum El Bouaghi, 2008, pp. 289–297.
- [18] Defraeye T., Radu A. *Insights in convective drying of fruit by coupled modeling of fruit drying, deformation, quality evolution and convective exchange with airflow*. *Appl Therm Eng.* 2018;129:320–331.
- [19] « Séchoir à infrarouge pour sécher les aliments », *FoodTechProcess*. Consulté le: 12 avril 2026. Disponible sur: <https://foodtechprocess.com/fr/secheurs/358-secheur-a-infrarouge-idu.html>
- [20] Bimbenet, J.J., Duquenoy, A., & Trystram, G. (2002). *Génie des procédés alimentaires : des bases aux applications*. Paris : Dunod. 368



Chapitre II : Modélisation mathématique



II.1 Revue bibliographique et état de l'art sur le séchage convectif et la modélisation CFD

Le séchage convectif à air chaud est l'une des méthodes les plus utilisées pour la conservation des produits agricoles. Les performances du procédé dépendent principalement de la température, de la vitesse de l'air, de son humidité et de la géométrie du séchoir. Une distribution non uniforme de ces paramètres peut provoquer un sous-séchage ou un sur-séchage du produit, ce qui dégrade sa qualité (texture, couleur, saveur et valeur nutritionnelle) tout en augmentant la consommation énergétique [1].

De nombreux travaux ont été consacrés à l'amélioration de l'uniformité du séchage. Pu et al. [2] ont optimisé le procédé en combinant le séchage convectif avec le séchage sous vide assisté par micro-ondes. Liu et al. [3] ont utilisé un modèle couplé CFD-DEM afin d'améliorer l'uniformité du séchage des grains. Al-Kayiem et al. [4] ont montré que l'inclinaison des plateaux à 30° et une vitesse d'air comprise entre 0,7 et 0,8 m/s permettent d'obtenir une distribution plus homogène de l'air dans un séchoir solaire multi-chambres. De leur côté, Onwude et al. [5] ont souligné l'intérêt du couplage entre le séchage à air chaud et les ultrasons pour améliorer les performances du procédé.

Dans les séchoirs à plusieurs plateaux, la non-uniformité du séchage augmente généralement avec le nombre d'échantillons et de plateaux. Cette hétérogénéité résulte des structures d'écoulement de l'air, des gradients de température et d'humidité ainsi que des interactions entre les plateaux, qui modifient les transferts de chaleur et de masse [6]. En conséquence, un contrôle plus précis des paramètres de fonctionnement devient nécessaire, ce qui peut entraîner une augmentation de la consommation énergétique.

Plusieurs solutions ont été proposées pour réduire cette non-uniformité. Das et al. [7] ont utilisé un séchoir batch à recirculation afin d'améliorer l'homogénéité du séchage. Misha et al. [8] ont montré, à l'aide de simulations CFD, que la permutation des plateaux permet d'obtenir une meilleure uniformité du produit séché. Plus récemment, Chandramohan et al. [9] ont développé un modèle CFD couplé aux transferts de chaleur et de masse pour étudier l'élimination de l'humidité dans des tranches de pommes de terre. Une autre étude a montré que la cinétique de séchage des pommes est fortement influencée par la complexité du champ d'écoulement autour du produit [10]. Ces travaux indiquent également que le champ d'écoulement dépend principalement de la géométrie du séchoir et de la vitesse de l'air. Hassan et al. [11,12] ont par ailleurs démontré que le taux de séchage n'augmente plus de manière significative lorsque la vitesse de l'air dépasse une valeur optimale.

Au cours des dernières années, plusieurs modèles mathématiques et simulations CFD ont été développés afin de mieux décrire les phénomènes de transfert de chaleur et de masse et d'améliorer l'uniformité du séchage [13,14]. Malgré ces avancées, la modélisation du séchage dans les séchoirs à plateaux multi-échantillons demeure encore limitée. Peu d'études considèrent simultanément les interactions entre les échantillons, les distributions de vitesse, de température et d'humidité ainsi que leur influence sur l'uniformité du séchage. Dans ce contexte,

le développement d'un modèle CFD couplé aux transferts de chaleur et de masse constitue une approche pertinente pour optimiser les conditions de fonctionnement et améliorer les performances des séchoirs convectifs.

II.2 Description du séchoir convectif et modèle géométrique 3D

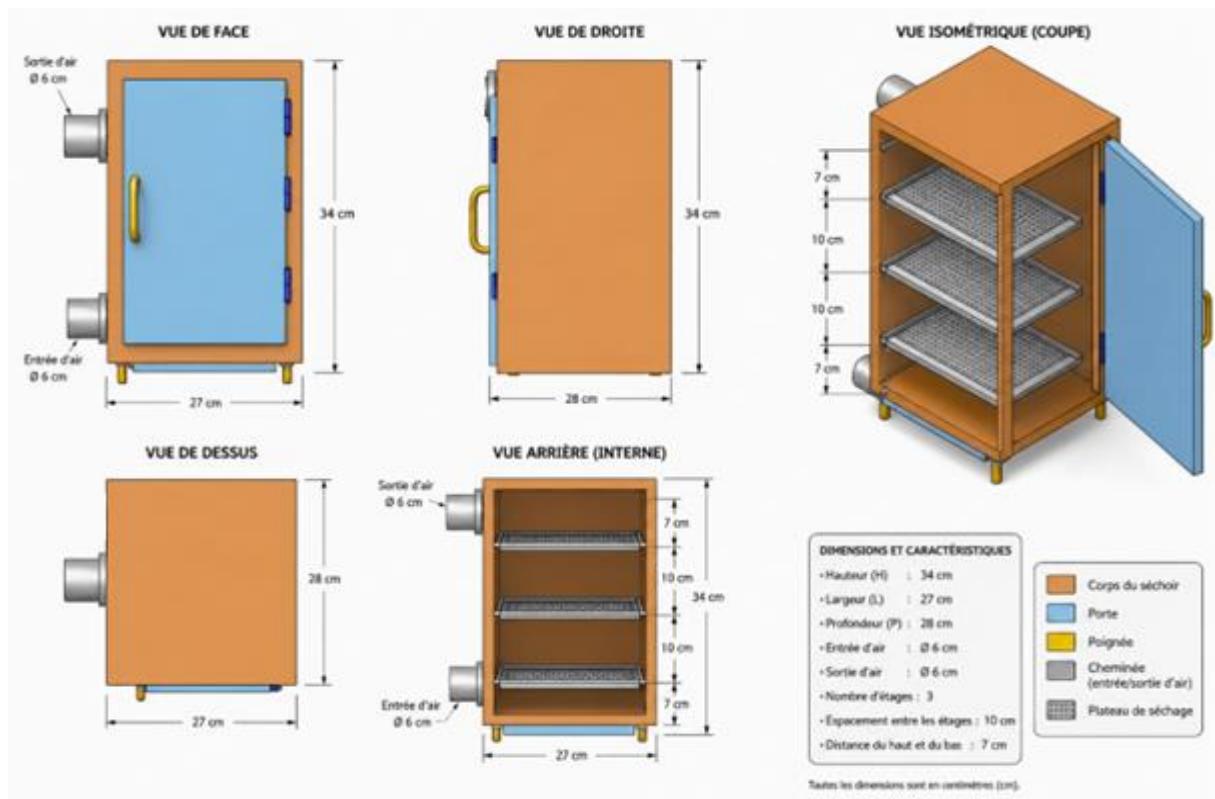
La Figure 2.1 présente le séchoir convectif conventionnel ainsi que son schéma de principe. Le système est constitué d'une entrée d'air, d'une sortie d'air, d'un ventilateur, d'une chambre de séchage et de trois plateaux destinés à recevoir le produit. La température et le débit d'air sont contrôlés afin d'assurer des conditions de séchage stables.

Pendant le séchage, l'air ambiant est aspiré par le ventilateur puis chauffé avant d'être introduit dans la chambre de séchage. L'air circule à travers les plateaux, transfère sa chaleur au produit et favorise l'évaporation de l'eau. L'air chargé d'humidité est ensuite évacué par la sortie du séchoir.

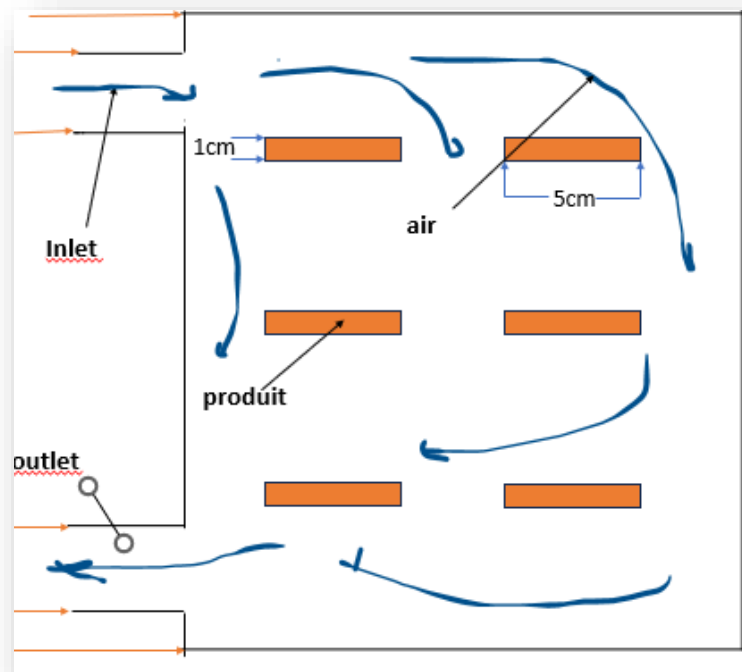
Afin de réduire le coût de calcul et la complexité des simulations CFD, seule la chambre de séchage est prise en compte dans le modèle numérique. La géométrie est représentée par un volume rectangulaire de dimensions **34 cm × 27 cm × 28 cm**, correspondant à un séchoir convectif de laboratoire.

Trois plateaux contenant les échantillons de pomme de terre sont intégrés dans la chambre afin d'étudier l'influence de leur position sur la distribution de l'écoulement d'air, de la température et du transfert de masse.

La géométrie est ensuite discrétisée à l'aide d'un maillage adapté aux simulations numériques. Le maillage a été généré avec **Gambit 2.3.16**, puis utilisé dans **ANSYS Fluent** pour la résolution des équations de conservation. Les modèles géométrique et maillé sont présentés à la Figure 2.2.



(a)



(b)

Figure II 1:(a) présente le séchoir convectif conventionnel (b) schéma de principe

II.3 Géométrie de la chambre de séchage

La chambre de séchage est modélisée par un parallélépipède rectangle de dimensions :

34 cm × 27 cm × 28 cm (0,34 m × 0,27 m × 0,28 m), représentant un séchoir convectif de laboratoire.

Le volume de la chambre est calculé par :

$$V_s = L \times B \times H = 0.34 \times 0.27 \times 0.28 = 0.0257 \text{ m}^3$$

Cette géométrie est utilisée pour les simulations CFD et permet d'intégrer les trois plateaux de séchage tout en assurant une circulation de l'air à l'intérieur de la chambre.

II.4 Équations gouvernantes

Les équations gouvernantes décrivent le comportement de l'air chaud circulant dans le séchoir ainsi que les échanges thermiques et massiques avec le produit à sécher. Elles sont basées sur les lois de conservation suivantes :

- la conservation de la masse (équation de continuité)
- la conservation de la quantité de mouvement (équations de Navier-Stokes)
- la conservation de l'énergie (équation de l'énergie) [16].

II.4.1 Équation générale de transport

C'est l'équation mère utilisée par Fluent.

$$\boxed{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u\phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi} \quad (2.1)$$

Les équations de continuité, de quantité de mouvement, d'énergie et de transport de l'humidité sont obtenues comme des cas particuliers de l'équation générale de transport.

II.4.2 Équation de continuité

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2.2)$$

II.4.3 Équations de Navier–Stokes

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad (2.3)$$

Cette forme est beaucoup plus élégante que celle avec les indices.

II.4.4 Équation de l'énergie

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2.4)$$

Puis

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) - \dot{m} L_v \quad (2.5)$$

II.4.5 Modèle de turbulence $k - \varepsilon$

L'écoulement d'air dans le séchoir est supposé turbulent. Le modèle standard $k - \varepsilon$ est adopté afin de représenter les effets de la turbulence sur les transferts de chaleur et de masse [17].

- **Équation de l'énergie cinétique turbulente :**

$$\rho \left(\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.6)$$

- **Équation du taux de dissipation :**

$$\rho \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.7)$$

La viscosité turbulente est calculée par :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

II.4.6 Transport de l'humidité

$$\frac{\partial(\rho Y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} Y) = \nabla \cdot (D_{eff} \nabla Y) + S_m \quad (2.9)[17]$$

II.4.7 Coefficients de transfert de chaleur et de masse

Les nombres de Nusselt et de Sherwood sont généralement utilisés pour évaluer respectivement les coefficients de transfert de chaleur et de masse à la surface du produit. Toutefois, dans le présent modèle numérique, le couplage entre les transferts de chaleur et de masse avec l'écoulement turbulent permet de déterminer directement ces coefficients de manière locale et instantanée dans le domaine.[16]

Les expressions empiriques utilisées sont données par :

$$Nu = \frac{h_T L}{k} = 0.029 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (2.9.1)$$

$$Sh = \frac{h_m L}{D} = 0.0296 Re^{0.5} Sc^{0.33} \quad (2.9.2)$$

II.5 Grandeurs psychrométriques de l'air humide

Les propriétés psychrométriques permettent de caractériser l'état thermodynamique de l'air humide et jouent un rôle essentiel dans l'analyse des phénomènes de transfert de chaleur et de masse au cours du séchage convectif.[19]

II.5.1 Humidité absolue :

$$x = \frac{m_v}{m_{a,sec}} [kg/kg] \quad (2.10)$$

En utilisant les lois des gaz parfaits, cette grandeur peut être exprimée en fonction des pressions partielles :

$$x = 0.622 \cdot \frac{P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (2.10.1)$$

Cette relation est fondamentale dans l'analyse des phénomènes de séchage et de conditionnement d'air [18-20]

II.5.2 Humidité relative :

L'humidité relative correspond au rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau et la pression de vapeur saturante à la même température

$$HR = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \times 100 \quad (2.11)$$

Où $P_{v,sat}$ est la pression de vapeur saturante. Cette grandeur est particulièrement importante pour caractériser l'état hygrométrique de l'air et son potentiel de séchage [20]

II.5.3 Taux de saturation

Le taux de saturation est défini par :

$$\psi = \frac{x}{x_{sat}} \quad (2.12)$$

avec :

$$x_{sat} = 0.622 \cdot \frac{P_{v,sat}}{P_{atm} - P_{v,sat}} \quad (2.12.1)$$

Ce paramètre permet d'évaluer l'écart entre l'état réel et l'état saturé de l'air [21]

II.5.4 Températures caractéristiques

Trois températures fondamentales permettent de décrire l'état de l'air humide :

- Température sèche (θ_s) : mesurée par un thermomètre standard.
- Température humide (θ_h) : obtenue par évaporation adiabatique.
- Température de rosée (θ_r) : température à laquelle la condensation débute.

La mesure de ces températures est réalisée à l'aide d'un psychromètre, instrument essentiel en génie climatique [22]

Le point de rosée correspond à la condition :

$$P_v = P_{v,sat}$$

ce qui marque le début de la condensation de la vapeur d'eau [23]

II.5.5 Volume spécifique

Le volume spécifique de l'air humide est défini comme le volume occupé par une unité de masse d'air sec :

$$v = \frac{V}{m_{a,sec}} = \frac{1}{\rho} \quad (2.13)$$

Cette grandeur est essentielle dans les calculs de dimensionnement des systèmes thermiques [24]

II.5.6 Masse volumique de l'air humide

II.5.6.1 Air sec

En appliquant l'équation des gaz parfaits :

$$PV = nRT \quad (2.14)$$

On obtient :

$$\rho_{a,sec} = \frac{P_{a,sec}}{287.1 \cdot T} \quad (2.15)$$

II.5.6.2 Air humide :

La masse volumique de l'air humide est la somme des contributions de l'air sec et de la vapeur d'eau :

$$\rho_{a,hum} = \frac{P_{a,sec}}{287.1 \cdot T} + \frac{P_v}{451.5 \cdot T} \quad (2.16)$$

Ces relations sont largement utilisées dans les modèles thermodynamiques avancés [25]

II.5.6.3 Enthalpie de l'air humide :

L'enthalpie de l'air humide représente l'énergie totale du mélange, incluant :

- Le chauffage de l'air sec.
- La vaporisation de l'eau.
- Le chauffage de la vapeur d'eau.

Elle s'exprime par :

$$h = C_{pa} \cdot \theta + x(C_{pve} \cdot \theta + L_v) \quad (2.17)$$

avec :

- $C_{pa} = 1.006 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
- $C_{pve} = 1.86 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$
- $L_v = 2501 \text{ kJ/kg}$

Soit :

$$h = 1.006\theta + x(1.86\theta + 2501) \quad (2.18)$$

Cette relation est fondamentale dans l'étude des procédés de séchage et de climatisation [26]

II.5.7 Mélange de deux airs humides

Lors du mélange de deux flux d'air humide, les propriétés du mélange sont données par des bilans de masse et d'énergie.

- **Humidité absolue :**

$$x_m = \frac{m_{a,1}x_1 + m_{a,2}x_2}{m_{a,1} + m_{a,2}} \quad (2.19)$$

- **Enthalpie :**

$$h_m = \frac{m_{a,1}h_1 + m_{a,2}h_2}{m_{a,1} + m_{a,2}} \quad (2.19.1)$$

Graphiquement, l'état du mélange se situe sur la droite reliant les deux états initiaux sur le diagramme psychrométrique [27]

II.5.8 Diagramme psychrométrique

Le diagramme psychrométrique constitue un outil graphique indispensable permettant de représenter l'état de l'air humide et ses transformations [18]

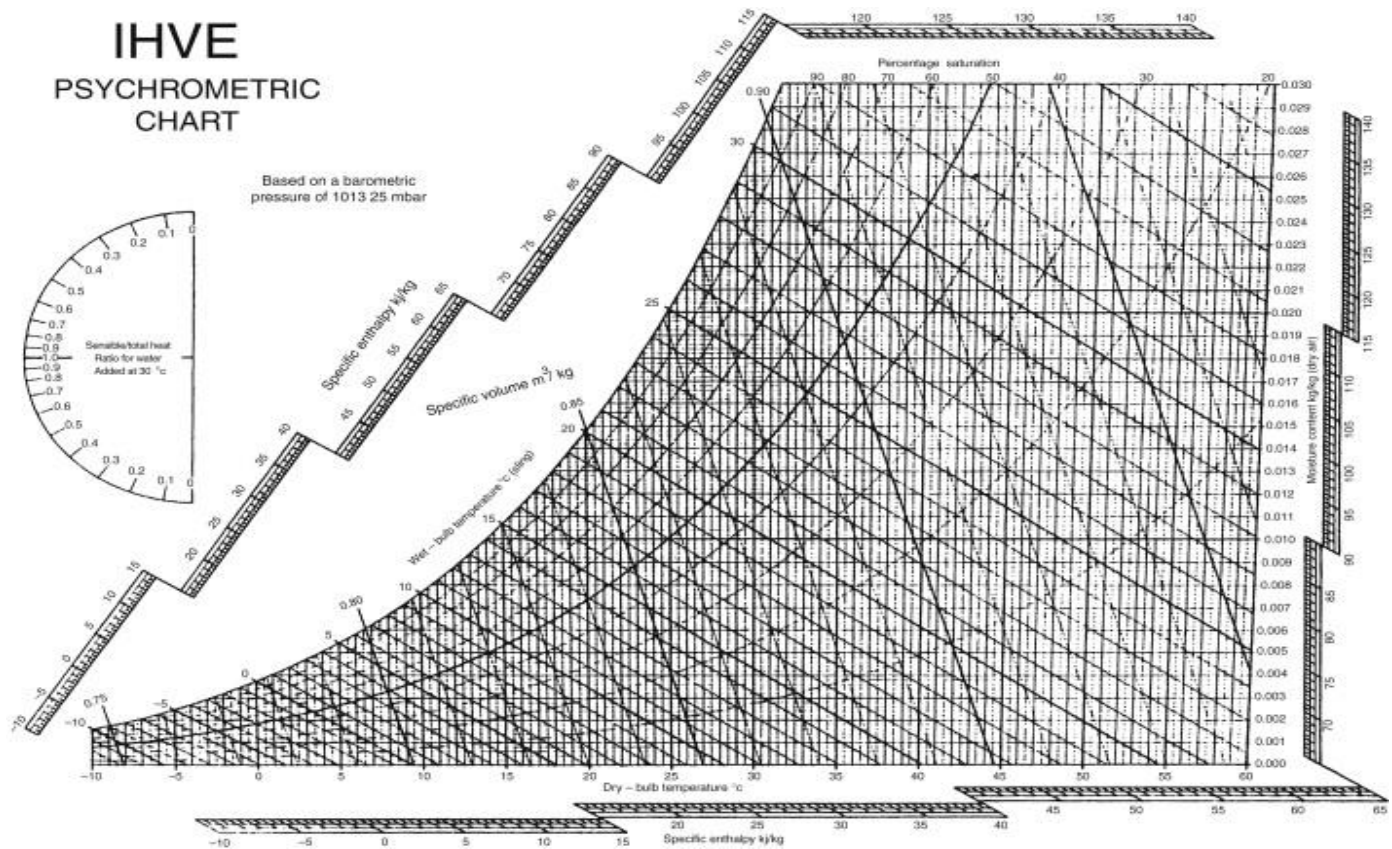


Figure II 2: Diagramme psychrométrique de l'air humide démonstratif

- Température sèche (axe horizontal)
- Humidité absolue (axe vertical)
- Courbes d'humidité relative
- Lignes d'enthalpie
- Température humide (lignes inclinées)
- le volume spécifique,
- le point de rosée,
- la température humide.

Dans le cas de l'air saturé, toutes les températures caractéristiques sont égales. [28]

II.6 Cinétique du séchage

II.6.1 L'analyse de la cinétique de séchage

L'analyse de la cinétique de séchage repose sur l'étude des courbes de Krischer, qui permettent une approche macroscopique du comportement du produit durant le séchage. Ces courbes mettent en évidence l'évolution de la vitesse de séchage en fonction du temps ou de la teneur en eau. Selon les conditions opératoires et la nature du produit, on distingue généralement trois à quatre phases caractéristiques du processus. Cette représentation met en évidence la transition entre un régime contrôlé par les conditions externes et un régime dominé par les résistances internes du matériau [29-30]

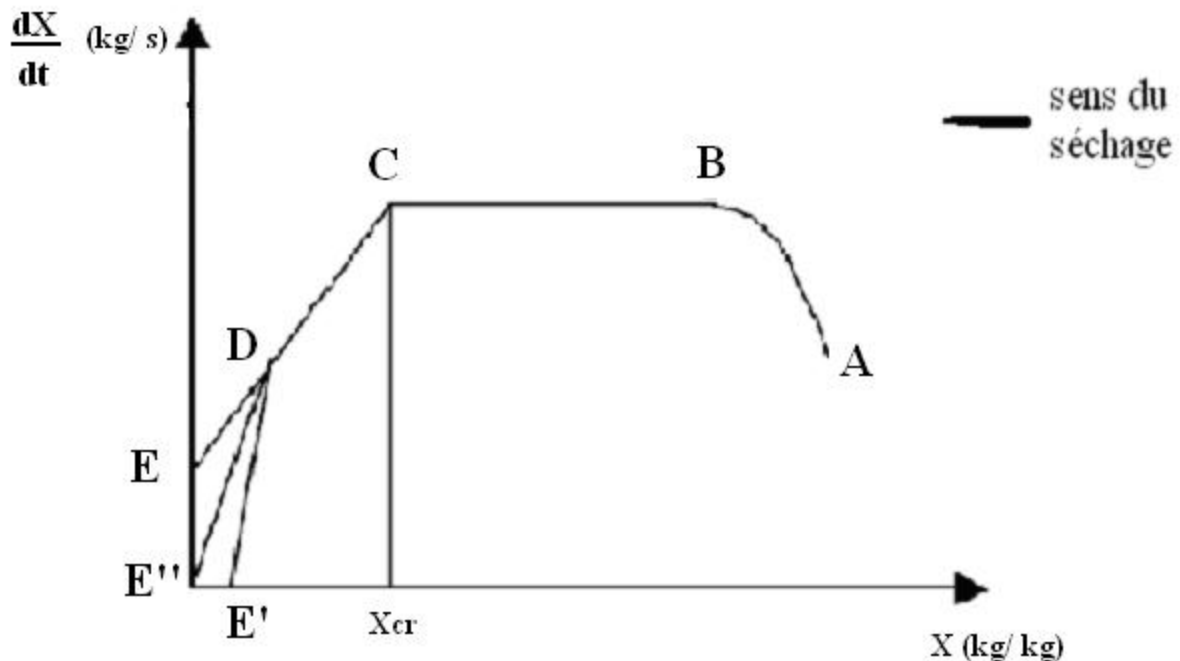


Figure II 3 : Courbe théorique de Krischer

AB= Période de mise en température du produit ;

BC= Période à vitesse de séchage constante ;

CD= Première période de ralentissement ;

DE'= Seconde période de ralentissement pour les matériaux hygroscopiques ;

DE''= Seconde période de ralentissement pour les matériaux non hygroscopiques ;

DE= Prolongement de la première période de ralentissement pour les matériaux non Hygroscopiques.

- *Période de mise en température*

La période de mise en température correspond à la phase initiale du séchage durant laquelle les transferts de chaleur et de masse à la surface du produit s'établissent progressivement jusqu'à atteindre un état quasi-stationnaire. Au cours de cette phase, la température du produit augmente jusqu'à atteindre la température humide correspondant aux conditions de l'air séchant (**zone A-B**).

Cette période est généralement très courte par rapport à la durée totale du séchage [29,30].

- **Période à vitesse de séchage constante**

Durant la période à vitesse constante, également qualifiée de phase isenthalpique, l'eau est évacuée à un flux constant (**zone B–C**). Le terme isenthalpique est utilisé lorsque la totalité de la chaleur fournie par convection est utilisée pour la vaporisation de l'eau. Toutefois, cette hypothèse n'est plus vérifiée lorsque des échanges thermiques supplémentaires interviennent, notamment par rayonnement ou conduction.

Au cours de cette phase, l'évaporation se produit à la surface du matériau, qui est recouverte d'un film d'eau continu. L'eau éliminée est essentiellement de l'eau libre, et la surface du produit conserve une température proche de la température humide définie lors de la phase précédente.

Cette période se maintient tant que la surface est alimentée en eau par migration interne depuis le cœur du matériau. Le flux de chaleur reste constant, et les résistances au transfert sont principalement localisées dans la couche limite externe.

Ainsi, la vitesse de séchage dépend essentiellement des conditions externes telles que la vitesse de l'air, son humidité, sa température, la surface d'échange et la pression. Cependant, l'état de surface du produit peut également influencer le flux de séchage, celui-ci étant généralement plus élevé pour une surface rugueuse que pour une surface plane [31].

- **Périodes de ralentissement**

Les périodes de ralentissement correspondent à une diminution progressive de la vitesse de séchage. Leur interprétation dépend du modèle considéré. Deux modèles principaux sont généralement utilisés : le modèle du front de séchage régressif (receding front model) et le modèle de surface partiellement mouillée (wetted-surface model) [32].

Figure 1 : Phases caractéristiques du séchage d'un matériau humide (période à vitesse constante et périodes à vitesse décroissante)

- **Modèle à front de séchage :**

Dans ce modèle, la première période de ralentissement (**zone C–D**) débute lorsque la surface du matériau atteint le seuil hygroscopique, c'est-à-dire lorsque toute l'eau libre en surface a été éliminée. Le front de vaporisation, initialement situé à la surface, migre alors vers l'intérieur du matériau.

Durant cette phase, la vitesse de séchage est contrôlée par les résistances internes au transfert de chaleur et de masse. Ces résistances augmentent à mesure que le front de séchage s'éloigne de la surface externe [33].

Lorsque le produit devient entièrement hygroscopique, c'est-à-dire qu'il ne reste que de l'eau liée, une seconde phase de ralentissement apparaît (**zone D-E'**). Le séchage se poursuit jusqu'à atteindre la teneur en eau d'équilibre dans les conditions opératoires considérées.

Dans le cas des matériaux non hygroscopiques, cette seconde phase n'existe pas : la première phase de ralentissement se prolonge jusqu'à la fin du séchage (**zone D-E**).

- **Modèle à surface humide (Wetted-Surface Model) :**

Selon ce modèle, la diminution de la vitesse de séchage est liée à l'apparition progressive de zones sèches à la surface du produit. Bien que le flux global diminue, le flux local rapporté à la fraction de surface encore mouillée reste constant.

Cette phase se poursuit jusqu'à l'assèchement complet de la surface externe (zone C-D) [4,5].

La seconde phase de ralentissement est dominée par la diffusion interne de l'eau à travers la matrice solide. Le séchage se termine soit à une teneur en eau nulle (zone D-E''), soit à la teneur en eau d'équilibre pour les matériaux hygroscopiques (zone D-E').

II.7 Formes de l'eau dans les produits :

L'eau présente dans les produits hygroscopiques joue un rôle déterminant dans les phénomènes de transfert de masse, de stabilité et de dégradation. D'un point de vue thermodynamique, elle est généralement classée en deux catégories principales : l'eau libre et l'eau liée. Cependant, cette distinction reste simplifiée, car la réalité physique met en évidence plusieurs états intermédiaires en fonction des interactions entre l'eau et la matrice solide.

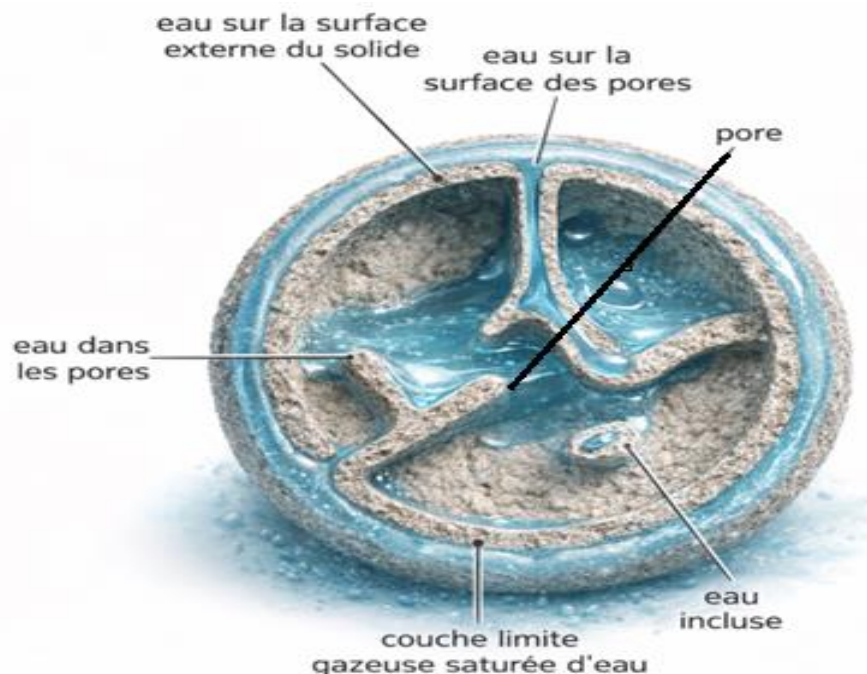


Figure II 4: Schéma d'un solide humide.

Des classifications plus détaillées ont ainsi été proposées afin de mieux décrire ces différents états.

- Vesilind et Martel (1989) ont établi une typologie basée sur des essais dilatométriques, distinguant quatre formes d'eau [29]:
 - L'eau libre, localisée à la surface du produit ou dans des cavités macroscopiques, facilement éliminable par des procédés mécaniques simples tels que la décantation ;
 - L'eau interstitielle, retenue dans les structures cellulaires, dont l'extraction nécessite une action mécanique entraînant la rupture des cellules ;
 - L'eau vicinale, adsorbée à la surface des particules solides par des liaisons hydrogène, nécessitant un apport énergétique pour être désorbée ;
 - L'eau d'hydratation, fortement liée chimiquement à la matière sèche, dont l'élimination requiert une énergie importante.
- Dans une autre approche, Smollen (1990) s'est appuyé sur l'évolution cinétique du séchage à basse température pour caractériser les formes d'eau [30]

. Il distingue ainsi :

Une eau libre, éliminée lors des premières étapes de déshydratation mécanique.

Une fraction dite eau immobilisée, évacuée durant la phase à vitesse constante du séchage.

Une eau liée, subsistant en fin de séchage et fortement associée à la matrice solide par des interactions physiques ou chimiques.

- Par ailleurs, Rozis et al. (1995) proposent une classification fondée sur la nature des forces de rétention et la localisation de l'eau dans le produit [30]. Trois catégories principales sont ainsi identifiées :
 - L'eau libre, présente à la surface ou dans des cavités internes, non adsorbée et facilement éliminable.
 - L'eau faiblement adsorbée, retenue par des forces capillaires au sein des tissus du produit

- L'eau fortement liée, fixée aux constituants de la matière sèche par des interactions électrochimiques, notamment les forces de Van der Waals.

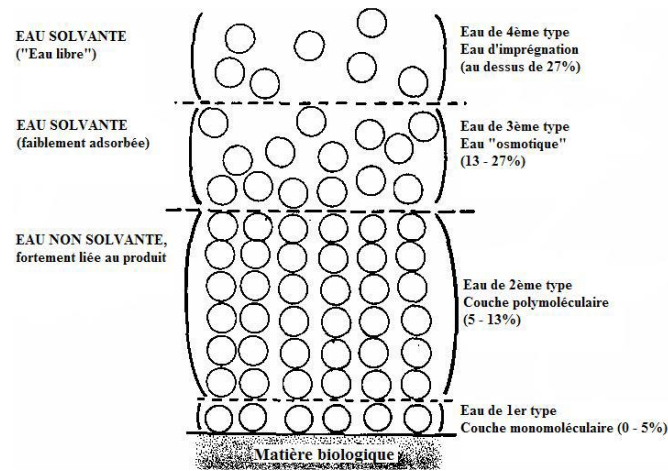


Figure II 5: Différents types d'eau dans le grain [31]

La figure II.2 fournit une illustration de fixation de l'eau dans le grain, dans cette classification, il est également admis que certaines formes d'eau (types 1 et 2) sont fortement liées et ne participent pas aux réactions de dégradation du produit. À l'inverse, les formes d'eau dites solvantes (types 3 et 4) favorisent les réactions biochimiques et microbiologiques, ce qui justifie leur élimination prioritaire lors du séchage [31 -33]

II.8 Activité de l'eau et humidité relative d'équilibre

La disponibilité de l'eau dans un aliment est caractérisée par l'activité de l'eau, notée a_w , qui représente le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau au-dessus de l'aliment et celle de l'eau pure à la même température :

$$a_w = \frac{P_v}{P_{v,sat}} \quad (2.20.1)$$

L'activité de l'eau est comprise entre 0 et 1. Elle diminue lorsque les forces de liaison entre l'eau et la matrice solide augmentent, et tend vers l'unité lorsque l'eau se rapproche de l'état libre [20-28]

Elle est également liée à l'humidité relative d'équilibre (HRE) par la relation :

$$a_w = \frac{HRE}{100} \quad (2.20.2)$$

II.8.1 Importance de l'activité de l'eau

L'activité de l'eau constitue un paramètre déterminant pour la stabilité des aliments. Elle permet de prédire :

- les réactions physicochimiques (oxydation, brunissement),
- les activités enzymatiques,
- le développement microbien.
- En effet, chaque type de micro-organisme nécessite une valeur minimale de a_w pour se développer :

Bactéries : $a_w > 0.91$

Levures : $a_w > 0.88$

Moisissures : $a_w > 0.80$

Ainsi, la réduction de l'activité de l'eau par séchage constitue un moyen efficace de conservation des aliments [34]

II.9 Modèles théoriques des isothermes de sorption

Les isothermes de sorption décrivent la relation d'équilibre entre la teneur en eau (X_{eq}) d'un produit et l'humidité relative (HR) de l'air à une température donnée. Elles sont largement utilisées pour caractériser le comportement hygroscopique des matériaux, prédire leur stabilité et optimiser les procédés de séchage et de conservation [35–40].

Plusieurs modèles mathématiques ont été proposés pour représenter les isothermes de sorption. Le modèle de **Langmuir** décrit une adsorption en monocouche sur des sites homogènes et s'applique principalement aux faibles humidités relatives [41]. Le modèle **BET** étend cette approche à l'adsorption multicouche, mais reste limité aux humidités relatives inférieures à 50 % [35,42–44]. Afin d'améliorer la représentation des données expérimentales sur une plus large plage d'humidité relative, le modèle **GAB** a été développé et constitue aujourd'hui le modèle le plus utilisé dans le domaine alimentaire [36–48].

Les modèles empiriques tels que **Henderson**, **Oswin**, **Halsey**, **Chung–Pfo** et **Harkins–Jura** sont également largement employés pour ajuster les données expérimentales selon le type de produit et les conditions de séchage [49–55].

Modèle	Équation	Domaine d'utilisation	Réf.
Langmuir	$X_{eq} = \frac{X_m kHR}{1 + kHR}$	Faibles HR	[41]
BET	$X_{eq} = \frac{X_m CHR}{(1 - HR)(1 + (C - 1)HR)}$	$HR < 0,5$	[35,42–44]
GAB	$X_{eq} = \frac{X_m CKHR}{(1 - KHR)(1 - KHR + CKHR)}$	$0 < HR < 0,9$	[36–48]
Henderson	$X_{eq} = \left[\frac{-\ln(1 - HR)}{k} \right]^{1/n}$	$HR > 0,5$	[51]
Oswin	$X_{eq} = k \left(\frac{HR}{1 - HR} \right)^n$	$0,1 < HR < 0,9$	[52]
Halsey	$X_{eq} = \left(\frac{-k}{\ln(HR)} \right)^{1/n}$	$0,1 < HR < 0,8$	[53]
Chung–Pfo	$X_{eq} = -\frac{1}{n} \ln \left(\frac{-\ln(HR)}{k} \right)$	$0,2 < HR < 0,9$	[54]
Harkins–Jura	$X_{eq} = \left(\frac{k}{-\log(HR)} \right)^{1/2}$	$HR > 0,8$	[55]

Tableau II 1: Principaux modèles d'isothermes de sorption

La température influence fortement les isothermes de sorption. Pour une humidité relative constante, une augmentation de la température entraîne généralement une diminution de la teneur en eau d'équilibre en raison de la réduction des forces de liaison entre l'eau et la matrice solide. Plusieurs modèles intègrent cet effet afin d'améliorer la prédiction des isothermes [47,50].

Les modèles d'isothermes de sorption constituent des outils essentiels pour la modélisation des transferts d'humidité. Parmi eux, le modèle **GAB** est le plus utilisé en génie alimentaire grâce à sa précision sur une large plage d'humidité relative [36–84].

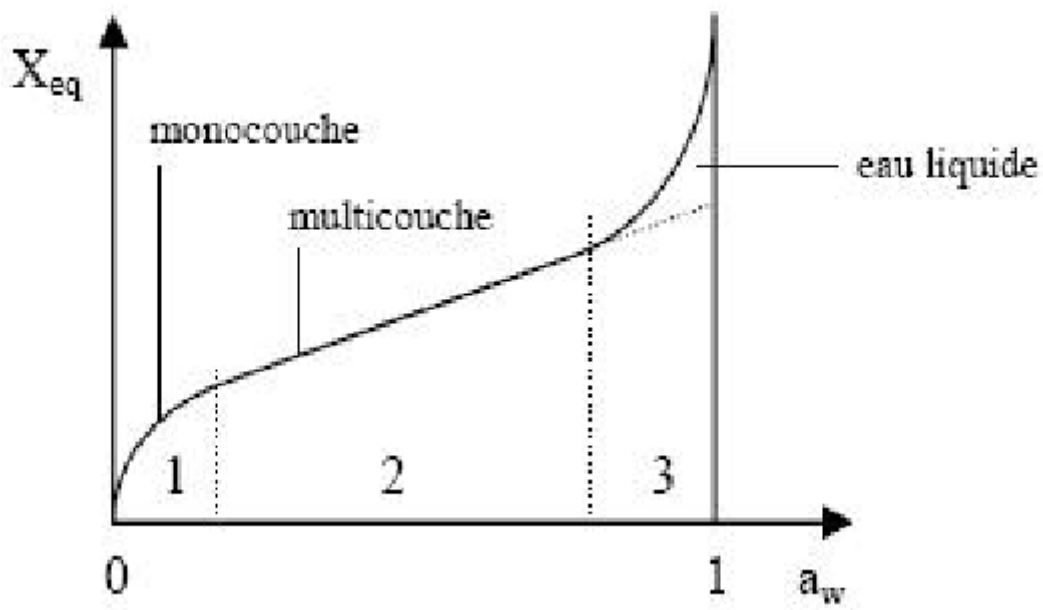


Figure II 6: Forme générale des isothermes de Pillard, 1997 et Jannot, 2003

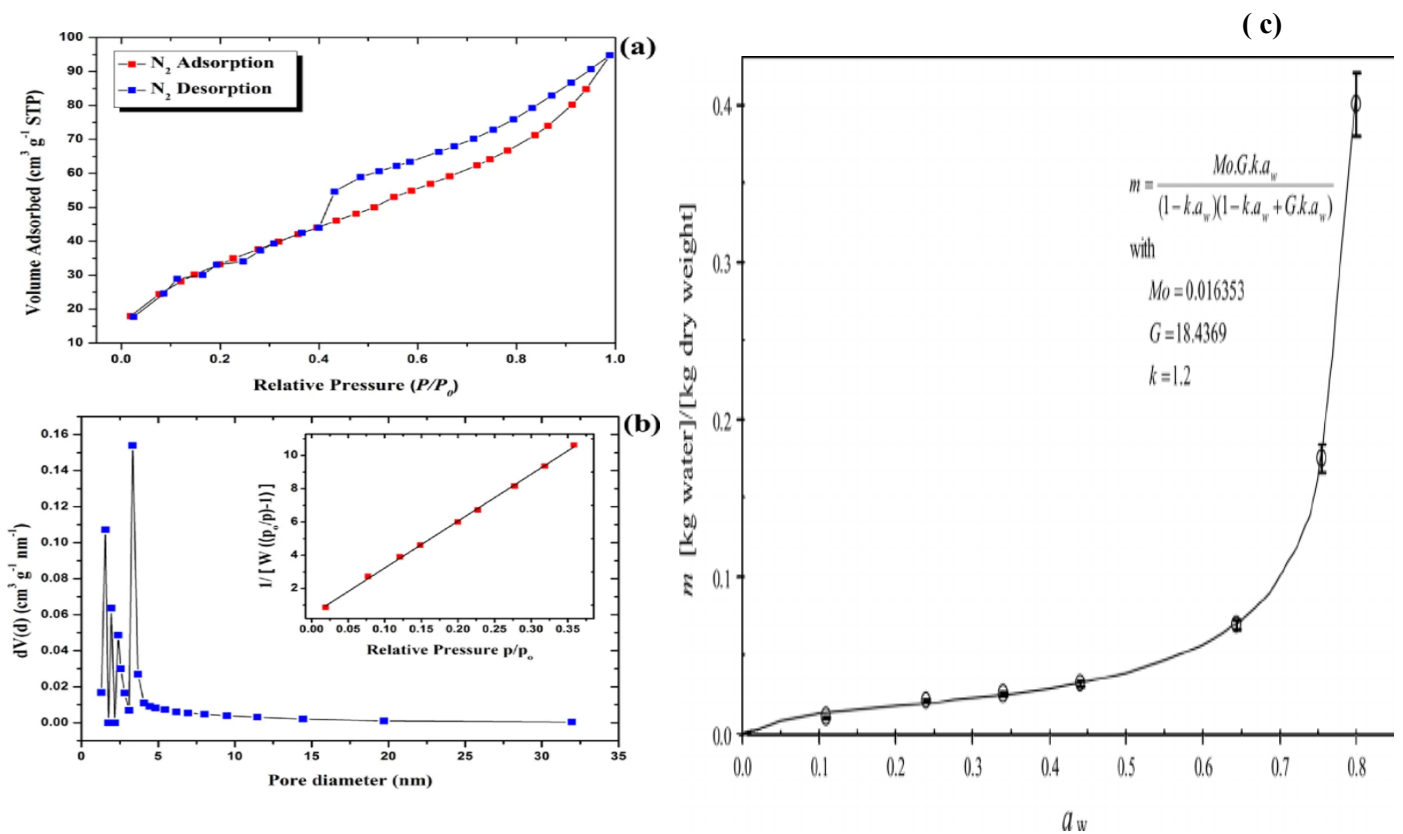


Figure II 7 : Isothermes de sorption (modèles BET(a) et (b) et GAB (c))

Fig (a) BET nitrogen adsorption isotherm plot. Fig (b) BET surface area and pore size distribution [56]

Fig (c) of the GAB equation to the sorption isotherm of popcorn, at 298.15 K. [57]

II.10 Bilans énergétique et de masse du séchage

II.10.1 Le bilan énergétique :

Le bilan énergétique du séchage est basé sur le principe de conservation de l'énergie. Dans un séchage convectif, l'énergie apportée par l'air chaud est utilisée pour chauffer le produit, évaporer l'eau et compenser les pertes thermiques. Le **bilan global** s'écrit :

$$Q_{air} = Q_{chauffage} + Q_{évaporation} + Q_{pertes} \quad (2.21.1)$$

Où Q_{air} est l'énergie fournie par l'air, $Q_{chauffage}$ l'énergie sensible, $Q_{évaporation}$ l'énergie latente de vaporisation et Q_{pertes} les pertes thermiques [28].

L'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau est donnée par :

$$Q_{évaporation} = m_{eau}L_v \quad (2.21.2)$$

- L'énergie nécessaire au chauffage du produit s'écrit :

$$Q_{chauffage} = m_p C_p (T_f - T_i) \quad (2.21.3)$$

La chaleur latente représente généralement la plus grande part de l'énergie consommée au cours du séchage [58].

- Le bilan énergétique appliqué à l'air de séchage est exprimé par :

$$\dot{m}_{air} C_{p,air} (T_{in} - T_{out}) = m_{eau} L_v \quad (2.21.4)$$

Cette relation relie la baisse de température de l'air à la quantité d'eau évaporée et permet d'évaluer les performances thermiques du séchoir [59].

- Le rendement énergétique est défini par :

$$\eta = \frac{Q_{évaporation}}{Q_{air}} \quad (2.21.5)$$

En raison des pertes thermiques et de l'évacuation de l'air humide, ce rendement reste

généralement inférieur à l'unité, ce qui justifie l'optimisation énergétique et l'utilisation de systèmes de récupération de chaleur [60].

II.10.2 Bilan de masse :

Le bilan de masse dans un procédé de séchage constitue une étape fondamentale pour quantifier les flux de matière, en particulier l'élimination de l'eau contenue dans un produit humide. Il repose sur le principe de **conservation de la masse**, selon lequel la variation de masse dans un système est égale à la différence entre les flux entrants et sortants.

Dans un système de séchage, on considère généralement deux phases :

- Le **solide humide (produit)**
- Le **fluide de séchage (air)**

-Le bilan global de masse s'écrit :

$$\text{Entrée} - \text{Sortie} = \text{Accumulation}$$

Dans le cas d'un régime stationnaire (souvent supposé en séchage continu) :

$$\text{Accumulation} = 0$$

-Bilan de masse sur le produit

La masse d'eau éliminée du produit est donnée par :

$$m_{\text{eau}} = m_{\text{produit}}(X_i - X_f) \quad (2.21.6)$$

Tapez une équation ici.

On peut aussi exprimer la teneur en humidité sur base humide :

$$X_{bh} = \frac{m_{\text{eau}}}{m_{\text{total}}} \quad (2.21.7)$$

Tapez une équation ici.

et sur base sèche :

$$X_{bs} = \frac{m_{\text{eau}}}{m_{\text{matière sèche}}} \quad (2.21.8)$$

Tapez une équation ici.

Ces relations sont essentielles pour passer d'une formulation à une autre selon les besoins expérimentaux ou industriels. [28]

-Bilan de masse différentiel

À l'échelle locale, le transfert d'humidité dans le produit est régi par la **deuxième loi de Fick** :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 X \quad (2.21.9)$$

Ce modèle décrit la migration de l'eau depuis l'intérieur du produit vers la surface. Il est particulièrement adapté à la phase à vitesse décroissante du séchage. [61]

- Bilan de masse sur l'air de séchage

L'air joue un rôle essentiel dans l'évacuation de la vapeur d'eau. Le bilan de masse de l'eau dans l'air s'écrit :

$$\dot{m}_{air}(Y_{out} - Y_{in}) = \dot{m}_{eau} \quad (2.21.10)$$

Cette équation permet de dimensionner le débit d'air nécessaire pour assurer un séchage efficace. [58]

- Couplage produit-air

Le séchage est un phénomène couplé, et le bilan global peut s'écrire :

$$\dot{m}_{produit}(X_i - X_f) = \dot{m}_{air}(Y_{out} - Y_{in}) \quad (2.21.11)$$

Cette relation relie directement : la perte d'eau du produit et le gain d'humidité de l'air

Elle est fondamentale pour la conception des séchoirs industriels. [60]

- Cinétique de séchage :

Le bilan de masse est souvent intégré dans des modèles cinétiques comme :

a) Modèle de Newton :

$$MR = e^{-kt} \quad (2.21.12)$$

b) Modèle de Page :

$$MR = e^{-kt^n} \quad (2.21.13)$$

Avec :

$$MR = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (2.21.14)$$

Ces modèles permettent de prédire l'évolution de l'humidité dans le temps. [61]

- Consommation énergétique

La consommation énergétique spécifique (SEC) est un indicateur important permettant d'évaluer l'efficacité du séchage.

$$SEC = \frac{E_{consommée}}{m_{eauévaporée}} \quad (2.21.15)$$

Elle est généralement exprimée en kJ/kg d'eau évaporée [62]

II.10.3 Transferts couplés de chaleur et de masse

Le séchage est un processus de transfert simultané de chaleur et de masse. Les modèles avancés prennent en compte les équations de conservation de l'énergie et de la masse ainsi que les propriétés psychrométriques de l'air humide [63].

- Modélisation du séchage des produits agroalimentaires

Le séchage des produits agroalimentaires est une opération unitaire fondamentale visant à réduire la teneur en humidité afin d'améliorer la conservation et la stabilité des produits. Le développement de modèles mathématiques permet de prédire l'évolution de la teneur en eau en fonction des conditions opératoires (température, humidité relative, vitesse de l'air) et du temps de séchage [28].

- Modélisation du séchage en couche mince

Le modèle de séchage en couche mince constitue la base de la simulation des procédés de séchage. Il représente l'échange d'humidité entre le produit et l'air environnant dans des conditions supposées uniformes. Mathématiquement, une couche mince est considérée comme un élément différentiel dans lequel les variations de température et d'humidité sont supposées linéaires [64].

- Modèles diffusifs

Le séchage des produits biologiques pendant la période à vitesse décroissante est principalement contrôlé par un mécanisme de diffusion de l'eau liquide et/ou vapeur à l'intérieur du produit. Le transfert de masse est généralement décrit par la diffusivité effective D_{eff} , indépendamment du mécanisme exact de diffusion [65].

La deuxième loi de Fick est largement utilisée pour modéliser ce phénomène :

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D_{eff} \nabla^2 m \quad (2.22.1)$$

Les solutions analytiques existent pour différentes géométries (plaque, cylindre, sphère) sous certaines hypothèses : homogénéité du matériau, absence de retrait, diffusion interne dominante et humidité initiale uniforme [66].

- Modèles semi-théoriques

Les modèles semi-théoriques sont basés sur des simplifications de la loi de diffusion de Fick ou sur l'analogie avec la loi de Newton du refroidissement. Ils supposent que la résistance principale au transfert d'humidité est concentrée dans la couche externe du produit.

Le modèle général est donné par :

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \quad (2.22.2)$$

Ces modèles incluent des formes largement utilisées telles que les modèles de Lewis et de Page, qui offrent un bon compromis entre simplicité et précision [67].

- Modèles empiriques

Les modèles empiriques établissent une relation directe entre la teneur en humidité et le temps de séchage à partir de données expérimentales. Ils ne prennent pas en compte les phénomènes physiques internes du produit.

Ces modèles sont simples à utiliser et très efficaces pour la prédiction dans les conditions expérimentales données, mais leurs paramètres n'ont pas de signification physique et leur validité reste limitée aux conditions de test [28].

Le modèle le plus simple est celui de **Newton (ou Lewis)** :

$$MR = e^{-kt}$$

Où MR est le rapport d'humidité réduit et k la constante de séchage.

D'autres modèles empiriques largement utilisés incluent le modèle de **Page** :

$$MR = e^{-kt^n}$$

Et celui de **Henderson et Pabis** :

$$MR = ae^{-kt} \quad (2.22.2)$$

Ces modèles sont simples à utiliser et offrent une bonne précision pour l'ajustement des courbes expérimentales.

II.11 Facteurs influençant le séchage :

Le processus de séchage est un phénomène complexe dépendant de plusieurs paramètres thermiques, physiques et environnementaux. Ces facteurs influencent directement la cinétique de séchage ainsi que la qualité finale du produit.

II.11.1 Température de l'air :

La température constitue l'un des paramètres les plus déterminants. Une augmentation de la température de l'air entraîne une élévation du gradient de pression de vapeur entre le produit et l'air ambiant, ce qui accélère le transfert de masse et réduit le temps de séchage [68].

II.11.2 Humidité relative de l'air :

Une faible humidité relative favorise l'évaporation de l'eau contenue dans le produit. À l'inverse, une humidité élevée ralentit le processus en réduisant la capacité de l'air à absorber l'humidité [58].

II.11.3 Vitesse de l'air :

La vitesse de l'air influence le transfert de chaleur et de masse à la surface du produit. Une augmentation de cette vitesse réduit la couche limite et améliore l'évaporation, surtout en phase de séchage à vitesse constante [68].

II.11.4 Propriétés du produit :

Les caractéristiques intrinsèques du produit jouent un rôle essentiel, notamment :

la **teneur initiale** en eau et, la **structure** interne, la **porosité**, la **taille** et l' des particules.

Ces paramètres conditionnent la diffusion interne de l'humidité [69].

II.11.5 Surface d'échange :

Une grande surface exposée favorise l'évaporation. Ainsi, la réduction de la taille ou l'augmentation de la surface spécifique du produit améliore la cinétique de séchage [58].

II.11.6 Pression et conditions ambiantes :

Les conditions environnementales, notamment la pression atmosphérique, influencent la température d'ébullition de l'eau et donc le mécanisme de séchage [68].

II.11.7 Mode de séchage :

Le type de séchage (naturel, convectif, solaire, sous vide, etc.) détermine les mécanismes de transfert thermique et massique impliqués [69].

Conclusion du Chapitre II

Dans ce chapitre, nous avons présenté les fondements théoriques relatifs au procédé de séchage convectif appliqué aux produits alimentaires, en particulier les pommes de terre. Une attention particulière a été portée à la description du fonctionnement du séchoir convectif proposé, ainsi qu'à l'analyse des phénomènes physiques intervenant durant le processus de séchage.

Les équations gouvernantes du transfert de chaleur, de masse et d'humidité ont été exposées, permettant de décrire le comportement thermo-physique du produit et de l'air de séchage.

Les notions fondamentales telles que l'humidité relative, la teneur en eau, ainsi que les mécanismes de diffusion interne et externe ont été détaillées afin de mieux comprendre les différentes étapes du séchage.

Par ailleurs, une revue des travaux scientifiques antérieurs a été réalisée afin de situer l'étude dans son contexte historique et scientifique. Les différents modèles cinétiques de séchage utilisés dans la littérature ont été présentés, ainsi que leurs approches de validation expérimentale et numérique.

Les courbes caractéristiques du séchage, notamment l'évolution de la teneur en eau, la vitesse de séchage et les courbes adimensionnelles d'humidité, ont été introduites comme outils essentiels pour l'analyse des performances du procédé.

Ces représentations graphiques permettent de mieux interpréter les phases du séchage et d'évaluer l'efficacité des modèles proposés.

Enfin, ce chapitre constitue une base théorique indispensable pour la suite du travail, notamment pour la mise en œuvre de la simulation numérique et l'analyse des résultats qui seront présentés dans les chapitres suivants.

Références bibliographiques chapitre II

- [1] W. Amjad, O. Hensel, A. Munir, A. Esper, B. Sturm, Thermodynamic analysis of drying process in a diagonal-batch dryer developed for batch uniformity using potato slices, *Journal of Food Engineering*, 169 (2016), 238–249.
- [2] Y.-Y. Pu, D.-W. Sun, Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution, *Biosystems Engineering*, 156 (2017), 108–119.
- [3] H. Liu, Y. He, T. Tang, M. Zhai, Prediction of the non-uniform drying of wet grain in a fluidised-bed based on a modified CFD-DEM drying model, *Biosystems Engineering*, 236 (2023), 103–119.
- [4] H.H. Al-Kayiem, A.A. Gitan, Flow uniformity assessment in a multi-chamber cabinet of a hybrid solar dryer, *Solar Energy*, 224 (2021), 823–832.
- [5] D.I. Onwude et al., Non-thermal hybrid drying of fruits and vegetables: A review of current technologies, *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 43 (2017), 223–238.
- [6] M. Francois, W. Shyy, Micro-scale drop dynamics for heat transfer enhancement, *Progress in Aerospace Sciences*, 38 (2002), 275–304.
- [7] S. Das et al., Development of an air recirculating tray dryer for high moisture biological materials, *Journal of Food Engineering*, 50 (2001), 223–227.
- [8] S. Misha et al., Simulation of air flow distribution in a tray dryer by CFD, *Proc. EE'15*, 2015, 126–135.
- [9] V. Chandramohan, Experimental analysis and simultaneous heat and moisture transfer with coupled CFD model for convective drying of moist object, *Int. J. Comput. Methods Eng. Sci. Mech.*, 17 (2016), 59–71.
- [10] T. Defraeye, A. Radu, Insights in convective drying of fruit..., *Applied Thermal Engineering*, 129 (2018), 1026–1038.
- [11] A. Hassan et al., *Energy Conversion and Management: X*, 16 (2022), 100296.
- [12] A. Hassan et al., *Case Studies in Thermal Engineering*, 48 (2023), 103084.
- [13] J. Waewsak et al., *Science & Technology Asia* (2006), 14–20.
- [14] S. Chou et al., *Food and Bioproducts Processing*, 78 (2000), 193–203.
- [15] C. Ertekin, M.Z. Firat, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57 (2017), 701–717.
- [16] F.P. Incropera et al., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Wiley, 2002.
- [17] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2nd ed., Pearson, 2007.
- [18] ASHRAE Handbook—Fundamentals: Psychrometrics, 2021.
- [19] D.P. Gatley, *Understanding Psychrometrics*, 3rd ed., ASHRAE, 2013.
- [20] S.A. Sherif, *ASHRAE Journal*, 44(7) (2002), 33–39.
- [21] R.W. Hyland, A. Wexler, *ASHRAE Transactions*, 89 (1983), 520–535.
- [22] L. Greenspan, A. Wexler, *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, 72 (1968), 33–47.
- [23] C.W. Meyer, A.H. Harvey, *AIChE Journal*, 61 (2015), 2913–2925.
- [24] R.B. Stewart et al., *ASHRAE Transactions*, 89 (1983), 536–548.
- [25] H.F. Nelson, H.J. Sauer, *HVAC&R Research*, 8 (2002), 311–334.
- [26] S. Herrmann et al., *HVAC&R Research*, 15 (2009), 961–986.
- [27] P.J. Mago, S.A. Sherif, *Proc. IMechE C*, 217 (2003), 705–718.

- [28] A.S. Mujumdar (Ed.), Handbook of Industrial Drying, 4th ed., CRC Press, 2014.
- [29] P.A. Vesilind, C.J. Martel, Sludge Dewatering, McGraw-Hill, 1989.
- [30] M. Smollen, Drying Technology, 8(2) (1990), 345–360.
- [31] J.F. Rozis et al., Séchage des produits agricoles et mécanismes de rétention de l'eau, 1995.
- [32] J.F. Cruz et al., Post-harvest Technology of Cereals, 1988.
- [33] M. Dagueneat, Le séchage des produits agricoles, Lavoisier, 1985.
- [34] FAO, Water Activity in Foods, Food Quality and Safety Systems, 2003.
- [35] S. Brunauer, P.H. Emmett, E. Teller, JACS, 60 (1938), 309–319.
- [36] E.A. Guggenheim, Applications of Statistical Mechanics, 1966.
- [37] R.B. Anderson, JACS, 68 (1946), 686–691.
- [38] C. van den Berg, S. Bruin, Academic Press, 1981.
- [39] H.A. Iglesias, J. Chirife, Academic Press, 1982.
- [40] T.P. Labuza, Food Technology, 22 (1968), 263–272.
- [41] T.P. Labuza, B. Altunakar, Blackwell, 2007.
- [42] S.S.H. Rizvi, CRC Press, 2005.
- [43] M. Peleg, J. Food Process Eng., 16 (1993), 21–37.
- [44] J. Chirife, H.A. Iglesias, Int. J. Food Sci. Technol., 13 (1978), 159–174.
- [45] H. Bizot, Applied Science, 1983.
- [46] M.S. Rahman, Food Properties Handbook, CRC Press, 2009.
- [47] A.H. Al-Muhtaseb et al., Food Bioprod. Process., 80 (2002), 118–128.
- [48] E.O. Timmermann, Colloids Surf. A, 220 (2003), 235–260.
- [49] K.S.W. Sing et al., Pure Appl. Chem., 57 (1985), 603–619.
- [50] Z.N. Veltchev, N.D. Menkov, J. Food Eng., 45 (2000), 157–164.
- [51] S.M. Henderson, Agricultural Engineering, 33 (1952), 29–32.
- [52] C.R. Oswin, J. Soc. Chem. Ind., 65 (1946), 419–421.
- [53] G. Halsey, J. Chem. Phys., 16 (1948), 931–937.
- [54] D.S. Chung, H.B. Pfost, Trans. ASAE, 10 (1967), 549–551.
- [55] W.D. Harkins, G. Jura, JACS, 66 (1944), 1366–1373.
- [56] Cellulose and Saccharomyces cerevisiae Embark To Recover Europium from Phosphor Powder, ResearchGate, 2019.
- [57] Evaluation of GAB Model for Sorption Isotherms, Journal of Food Engineering, 40 (1999), 45–52.
- [58] C.J. Geankoplis, Transport Processes and Separation Process Principles, 4th ed., 2003.
- [59] F.P. Incropera et al., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th ed., Wiley, 2011.
- [60] P. Caccavale et al., J. Food Eng., 169 (2016), 1–17.
- [61] J. Crank, The Mathematics of Diffusion, 2nd ed., 1975.
- [62] I. Dincer, A.Z. Sahin, Int. J. Heat Mass Transfer, 47 (2004), 645–652.

- [63] D.B. Brooker et al., Drying and Storage of Grains and Oilseeds, Springer,1974.
- [64] J. Wang, R. Singh, Drying Theory and Simulation, Journal of Food Engineering, 2004.
- [65] S. Pabis et al., Grain Drying: Theory and Practice, CRC Press,1998.
- [66] S. Devahastin, Heat and Mass Transfer in Food Processing,2000.
- [67] A. Midilli, H. Kucuk, Z. Yapar, Drying Technology,20 (2002),1503–1513.
- [68] A.S. Mujumdar (Ed.), Handbook of Industrial Drying, 3rd ed., CRC Press,2006.
- [69] R.B. Keey, Drying of Loose and Particu



Chapitre III : Description du système et modélisation numérique



III.1 Introduction

Dans cette étude, la pomme de terre a été modélisée comme un milieu poreux homogène afin de représenter les phénomènes globaux de transfert de chaleur et de masse au cours du séchage. Cette approche n'a pas pour objectif de reproduire la microstructure réelle du produit, mais de décrire les échanges entre l'air chaud et la pomme de terre. Elle permet d'étudier l'influence des principaux paramètres opératoires, notamment la température et la vitesse de l'air de séchage, sur les performances du procédé, tout en limitant la complexité du modèle numérique et le temps de calcul.

III.2 Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis (Finite Volume Method, FVM) est l'une des méthodes numériques les plus utilisées en mécanique des fluides numérique (CFD). Elle consiste à subdiviser le domaine de calcul en un ensemble de **volumes de contrôle**, sur lesquels les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie et du transport de masse sont intégrées [1–5].

Cette méthode transforme les équations différentielles en un système d'équations algébriques résolu numériquement. Son principal avantage est de garantir la **conservation des grandeurs physiques** entre les volumes de contrôle adjacents, ce qui la rend particulièrement adaptée aux simulations réalisées avec **ANSYS Fluent 6.3.26** [1,2].

Dans cette étude, la méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre les équations gouvernant les transferts de chaleur et de masse au cours du séchage de la pomme de terre.

Les principales étapes sont :

- Discrétisation du domaine en volumes de contrôle ;
- Intégration des équations de conservation ;
- Discrétisation en équations algébriques ;
- Résolution itérative jusqu'à convergence.

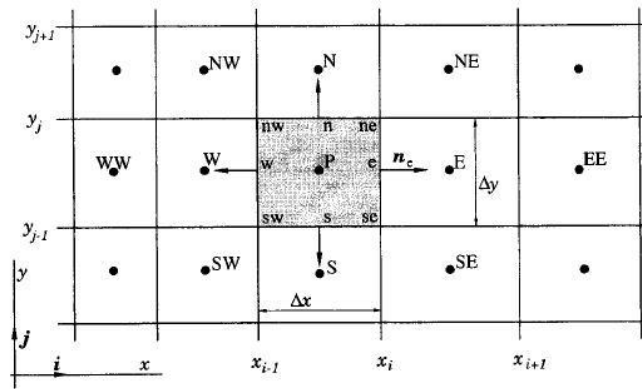


Figure III 1: Principe de la méthode des volumes finis (adapté de Versteeg et Malalasekera [1])

III.3 Introduction à la simulation du séchage

La simulation numérique consiste à résoudre des modèles mathématiques représentant un système physique réel afin d'analyser le comportement du séchoir dans différentes conditions de fonctionnement. Dans le cas du séchoir à plateaux pour la pomme de terre, elle permet d'étudier les transferts de chaleur et de masse (convection, diffusion et évaporation), d'analyser l'interaction air-produit, d'évaluer les performances du système (rendement thermique et efficacité de séchage) et d'optimiser les paramètres opératoires tels que la température, la vitesse de l'air et le temps de séchage. Elle permet également de comparer des configurations de séchoir **Fig. III.1**

Afin d'évaluer leur influence sur l'uniformité de séchage et les performances globales.

La modélisation géométrique et la génération du maillage sont réalisées à l'aide du préprocesseur **GAMBIT 2.3.16**, tandis que la résolution numérique des équations gouvernantes est effectuée avec le solveur CFD **FLUENT 6.3.26**. Ces outils permettent de simuler les écoulements turbulents et les transferts couplés de chaleur et de masse avec une bonne précision, tout en offrant une grande flexibilité pour les études paramétriques et l'optimisation du système.

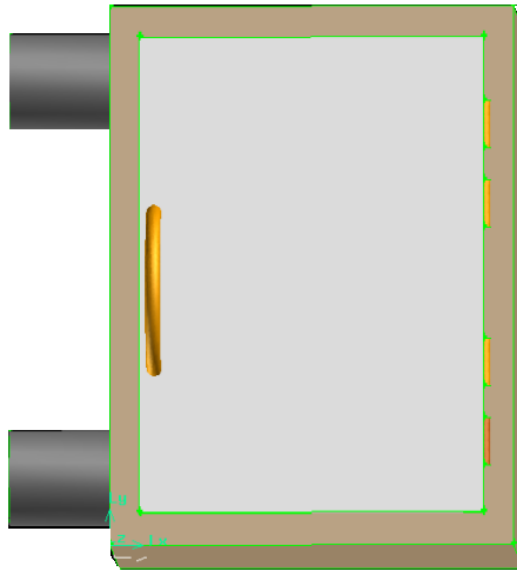


Figure III 2:SECHOIR DE EXPERIANCE

III.3.2 Outils de simulation : Gambit et Fluent

III.3.2.1 L'outil Gambit

GAMBIT 2.3.16 est un logiciel de prétraitement utilisé pour la création de la géométrie et la génération du maillage, destiné notamment à être exploité dans **ANSYS Fluent 6.3.26**.

Le maillage constitue une étape essentielle dans toute simulation numérique, puisqu'il permet de discrétiser le domaine physique en un ensemble fini de cellules sur lesquelles les équations de conservation seront résolues.

GAMBIT offre la possibilité de générer différents types de maillages :

- Maillage structuré ou non structuré
- En coordonnées cartésiennes, cylindriques, polaires ou axisymétriques
- En deux dimensions (2D) ou en trois dimensions (3D)

Il permet également de traiter des géométries complexes en utilisant des éléments de type quadrilatéral, triangulaire (en 2D) ou tétraédrique et hexaédrique (en 3D).

Dans le cadre de cette étude, GAMBIT est utilisé pour modéliser la géométrie du séchoir à plateaux et générer un maillage adapté, garantissant une bonne précision des résultats tout en optimisant le temps de calcul.

- Vue globale

Après le lancement du logiciel, l'interface principale de GAMBIT apparaît.

Cette interface permet à l'utilisateur d'accéder aux différentes fonctionnalités nécessaires à la

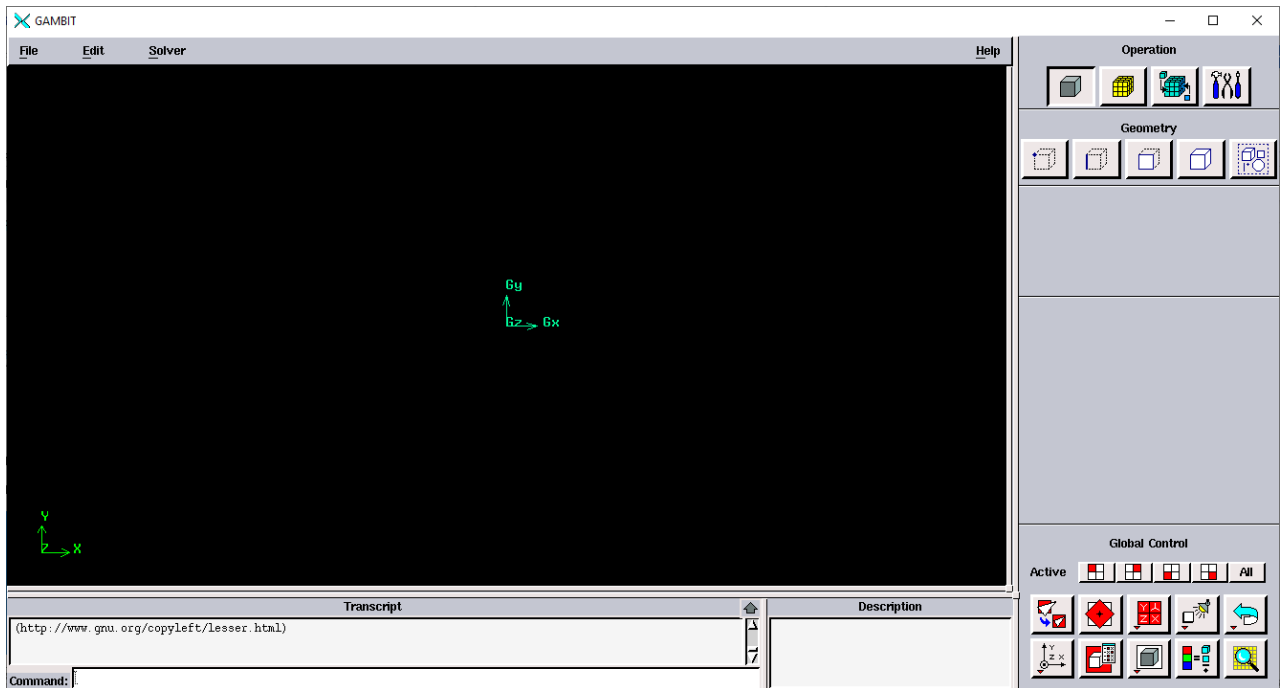


Figure III 3:Vue globale de GAMBIT

création de la géométrie, à la génération du maillage ainsi qu'à la définition des zones de calcul.[6]

Important : Avant même de créer la géométrie il faut choisir le type de solver ; c'est-à-dire le type de logiciel (ici fluent) qu'on va utiliser par la suite (choisir la bonne version du logiciel dans notre cas choisir Fluent 5/6).

III.3.2.2 Construction du maillage

La construction du maillage constitue une étape fondamentale dans le processus de simulation numérique. Elle permet de discrétiser le domaine physique en un ensemble de cellules sur lesquelles seront résolues les équations gouvernantes.

Pour élaborer un maillage de qualité, il est recommandé de suivre les étapes suivantes :

- Définir la géométrie du domaine d'étude
- Générer le maillage
- Définir les paramètres des différentes zones de calcul

1. La première étape consiste à définir la géométrie de séchoir, qui représente fidèlement le domaine physique à étudier. Celle-ci est décrite à partir de points caractéristiques tels que les sommets d'une surface, les extrémités d'une ligne ou encore les paramètres d'un arc (centre et ouverture angulaire). L'ensemble du domaine doit être construit à partir de formes géométriques simples interconnectées, facilitant ainsi la génération du maillage [7].

2. Dans le cas d'un maillage structuré, il existe une correspondance directe entre la géométrie et le maillage. Il est donc nécessaire, avant la phase de maillage, de définir précisément la géométrie adoptée ainsi que la numérotation des cellules associées aux points caractéristiques. Un nœud peut alors être identifié soit par ses coordonnées physiques (x, y), soit par ses indices (i, j) dans le maillage.

3. Par ailleurs, l'introduction de points intermédiaires peut s'avérer très utile. Bien qu'ils ne soient pas indispensables à la définition géométrique, ces points permettent de subdiviser le domaine en sous-zones spécifiques. Cela facilite notamment le raffinement local du maillage dans les régions critiques, telles que les zones proches des parois, des obstacles ou des interfaces fluide-produit, où les gradients de température et de concentration sont importants [8].

Dans cette étude, un soin particulier a été apporté au raffinement du maillage au voisinage des plateaux et de la couche de pomme de terre afin d'améliorer la précision de la simulation des phénomènes de transfert de chaleur et de masse.

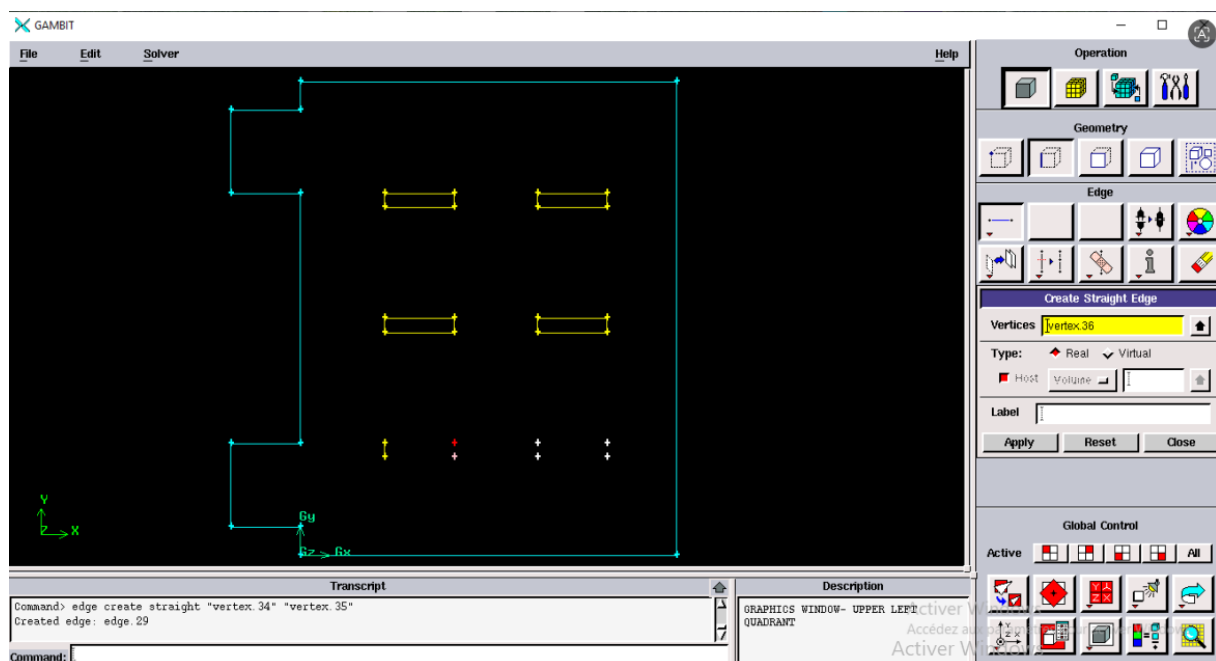


Figure III 4::définir la géométrie de séchoir sur gambit 2.3.16

III.3.2.3 Interprétation du maillage utilisé

Le maillage adopté est de type **structuré quadrangulaire (quad)** avec une **distribution uniforme**, généré à l'aide du logiciel *Gambit 2.3.16*. Ce type de maillage présente plusieurs avantages, notamment :

- une bonne qualité des éléments,
- une excellente orthogonalité,
- une stabilité numérique accrue lors des simulations CFD.

Cependant, dans le cas du séchage convectif, des **gradients importants de température et d'humidité apparaissent au voisinage de la surface du produit (batata)**. Un maillage uniforme peut donc être insuffisant pour capturer avec précision ces variations locales.

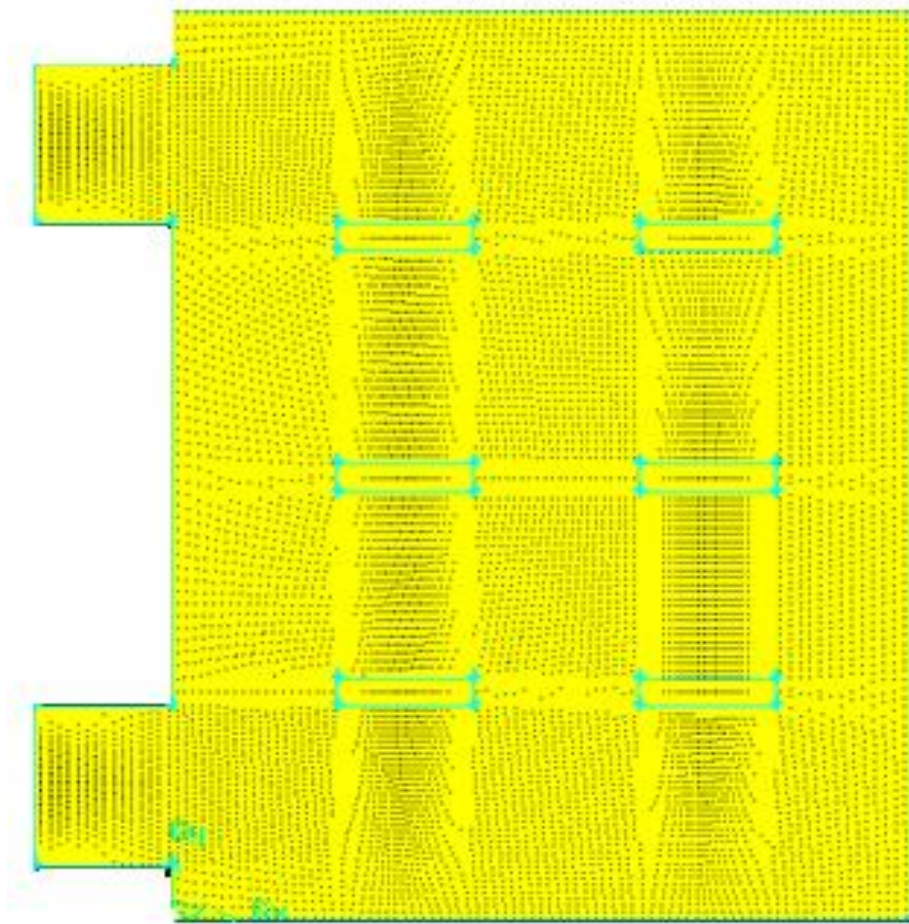


Figure III 5 le maillage de séchoir

Bien que le maillage uniforme assure une bonne stabilité numérique, un raffinement local au niveau **des parois du produit** peut être nécessaire afin de mieux représenter les phénomènes de transfert thermique et massique.

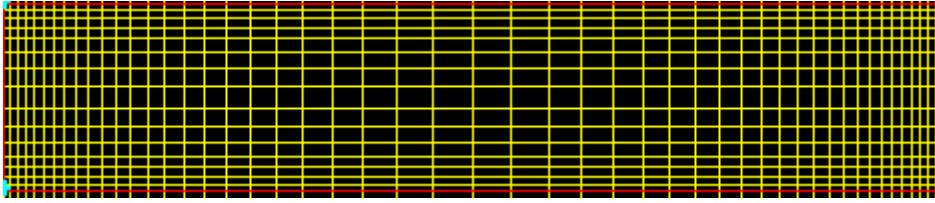


Figure III 6 : Le maillage d'un produit

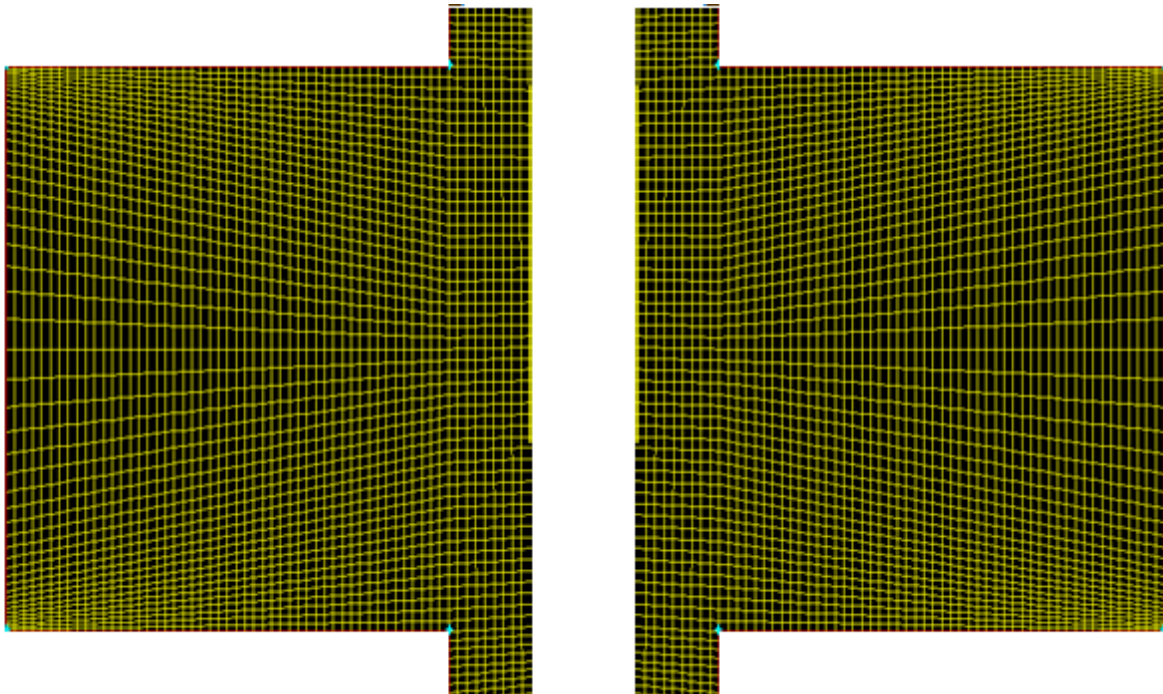


Figure III 7: Le maillage de l'antre et sortie d'air

III.3.2.4 Analyse de la sensibilité du maillage

Une étude d'indépendance du maillage a été réalisée en utilisant **trois niveaux** de raffinement. Les résultats obtenus montrent une faible variation entre le maillage **moyen** et le maillage **fin**, ce qui indique que la solution numérique est indépendante du maillage. Le maillage moyen a donc été retenu pour la suite des simulations.

III.4 Procédure de résolution sous ANSYS Fluent 6.3.26

Cette partie explique comment **Fluent** utilise les équations précédentes.

III.4.1 Importation du maillage

Le maillage généré sous **Gambit** est importé dans **ANSYS Fluent 6.3.26**. Le domaine de calcul est subdivisé en volumes de contrôle conformément à la méthode des volumes finis. Les propriétés physiques des matériaux et les conditions aux limites sont ensuite définies.

III.4.2 Choix du solveur

Le solveur **Pressure-Based** est sélectionné, car il est adapté aux écoulements incompressibles rencontrés dans les procédés de séchage.

Le couplage pression–vitesse est assuré par l'algorithme **SIMPLE**, tandis que la discrétisation spatiale est réalisée par la méthode des volumes finis.

Équations activées : continuité + quantité de mouvement + énergie + espèces (Yv).

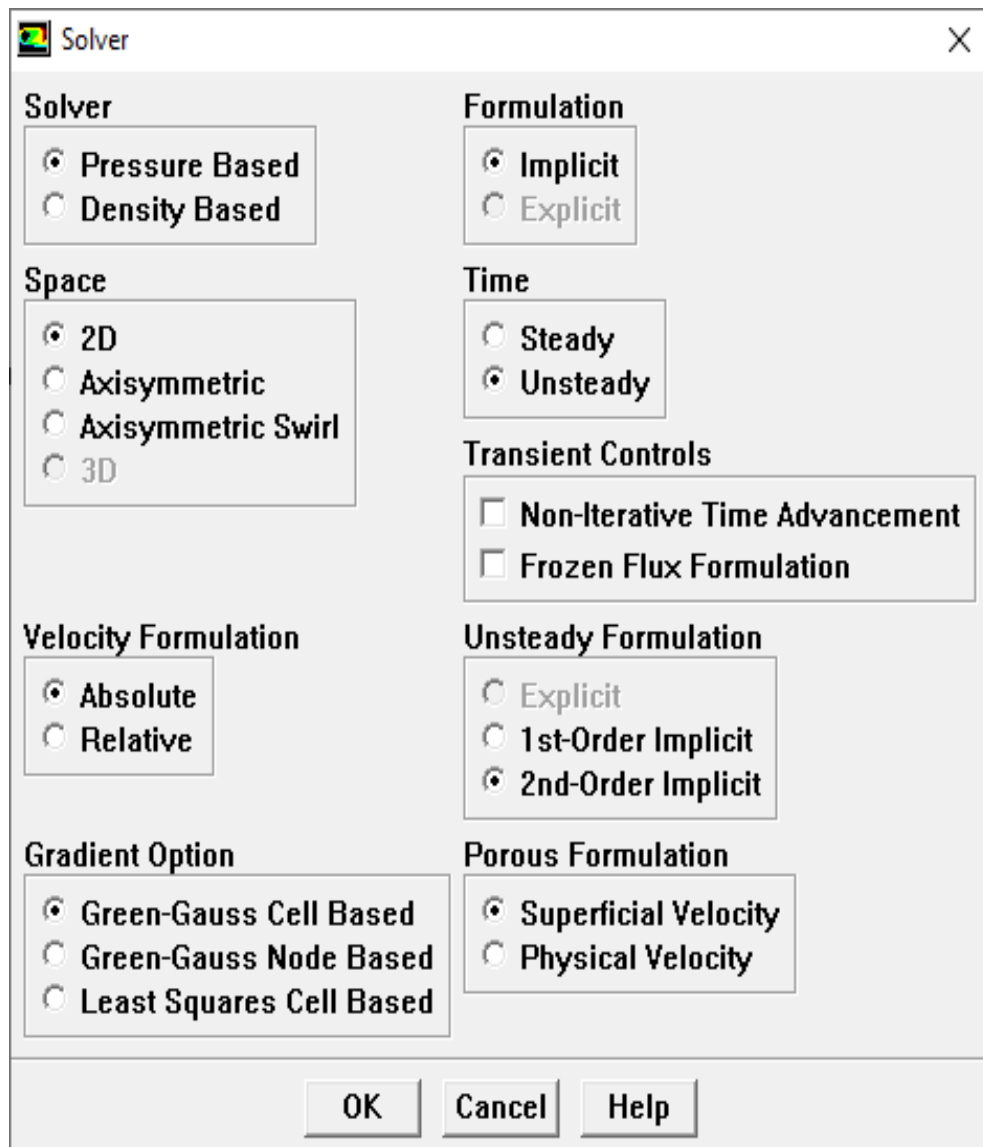


Figure 8:Choix du solveur

III.4.3 Activation des modèles physiques

Les modèles suivants sont activés :

- **Energy Equation** pour résoudre les équations (3.3) et (3.4) ;

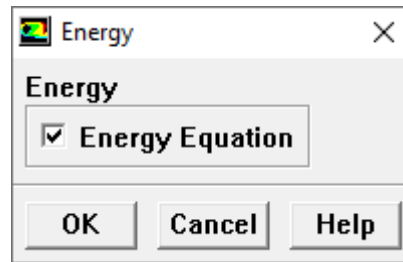


Figure III 9:energy

- **Standard $k - \varepsilon$** pour résoudre les équations (3.5), (3.6) et (3.7) ;

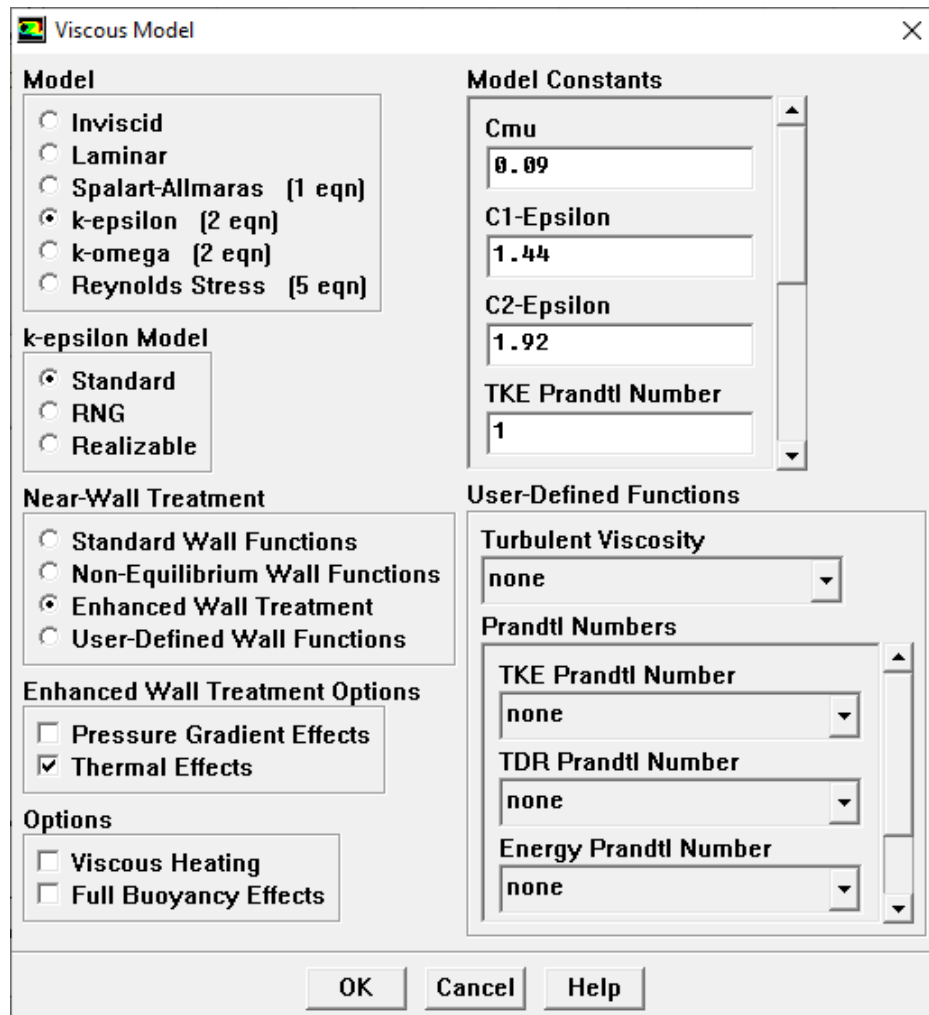


Figure III 10 :chois viscos Model

- **Species Transport** pour résoudre l'équation (3.8) relative au transport de la vapeur d'eau.

Transport d'espèces : ON (air sec + vapeur d'eau)).

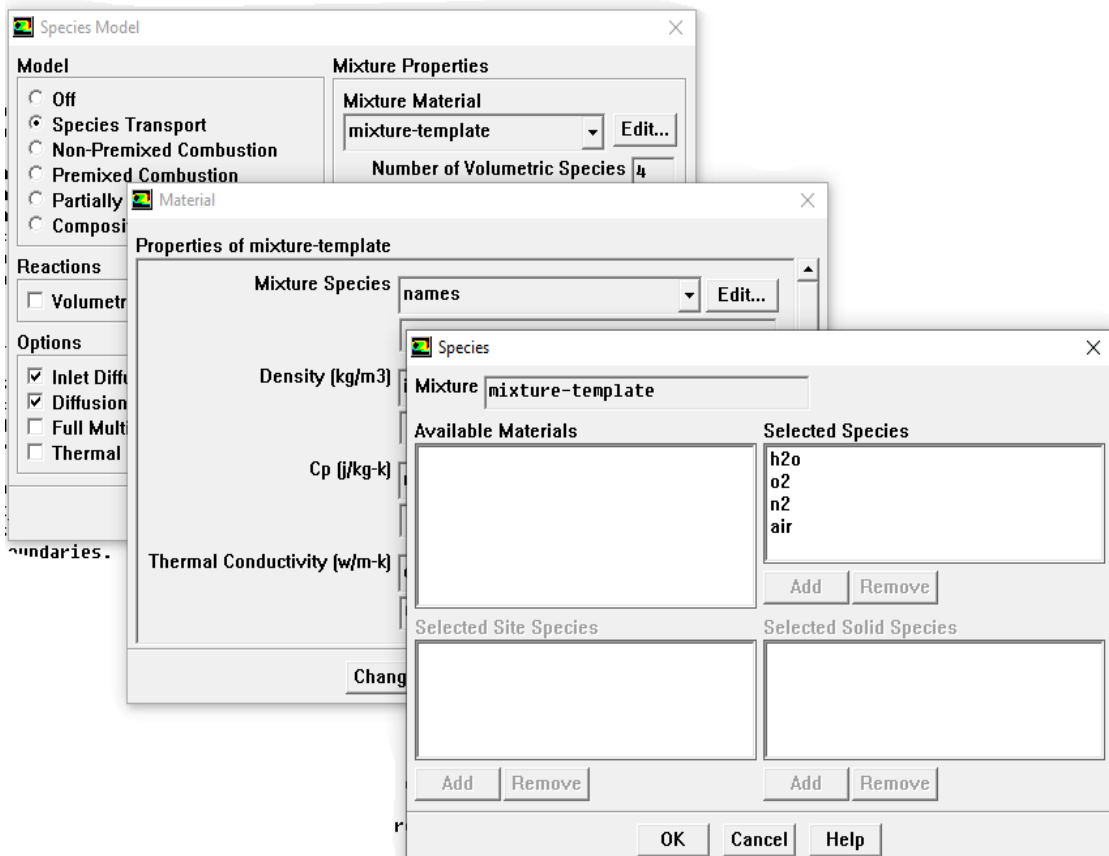


Figure III 11:Transport d'espèces

- Les équations de continuité (3.1) et de Navier–Stokes (3.2) sont résolues automatiquement par Fluent.

III.4.4 Procédure itérative de résolution

À chaque itération, Fluent résout successivement :

1. l'équation de continuité (3.1) ;
2. les équations de Navier–Stokes (3.2) ;
3. les équations de turbulence (3.5) à (3.7) ;
4. les équations de l'énergie (3.3) et (3.4) ;
5. l'équation de transport de l'humidité (3.8).

Les variables sont ensuite mises à jour jusqu'à satisfaction des critères de convergence.

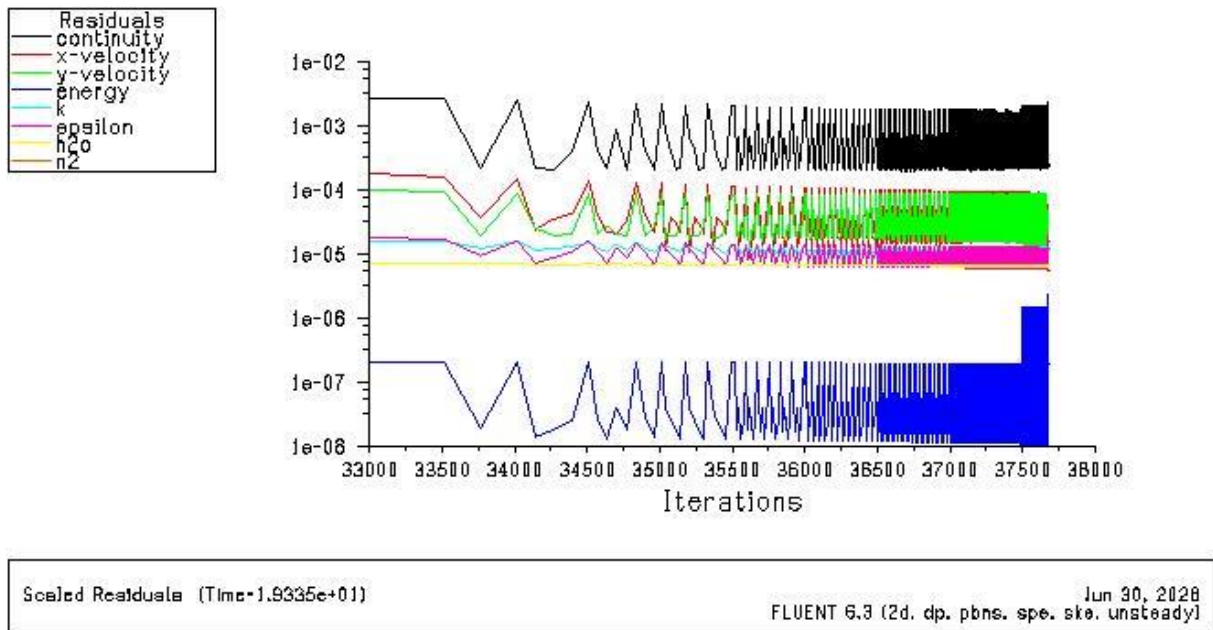


Figure III 12: Itirations de sumelation

III.4.5 Critères de convergence

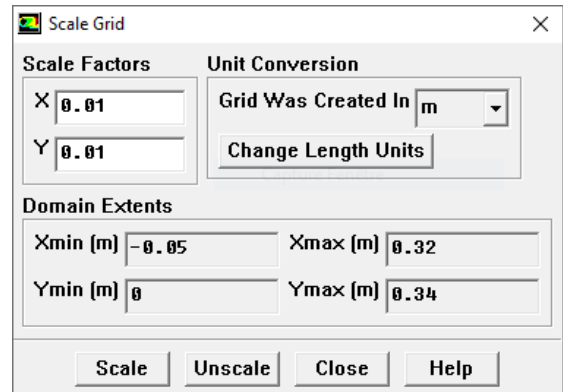
La convergence est considérée atteinte lorsque les résidus normalisés des équations deviennent inférieurs aux valeurs imposées par Fluent (généralement 10^{-3} pour la continuité, la quantité de mouvement et la turbulence, et 10^{-6} pour l'énergie). En complément, les grandeurs globales telles que la température moyenne, la vitesse et la fraction massique de vapeur d'eau doivent se stabiliser au cours des itérations.

III.5 Importer le mailing & définition des zones.

- FLUENT :

- Mesh → Checket Mesh → Scale(unités)
- Nommer les frontières : entrée , sortie , murs , patate_surface , etc

(a)



(b)

Domain Extents:
x-coordinate: min (m) = -5.000000e-002, max (m) = 3.200000e-001
y-coordinate: min (m) = 0.000000e+000, max (m) = 3.400000e-001
Volume statistics:
minimum volume (m3): 2.104744e-008
maximum volume (m3): 9.203802e-006
total volume (m3): 9.780000e-002
Face area statistics:
minimum face area (m2): 8.675605e-005
maximum face area (m2): 6.363407e-003
Checking number of nodes per cell.
Checking number of faces per cell.

(c)

Figure III 13 : (a) définition les zones ; (b) : entree l'unités ; (c) : vérifie les unités

- Matériaux.

Air humide :

- Air + vapeur d'eau (H2O) en mélange
- Diffusion : valeurs par défaut FLUENT ou corrélations

Solide (si conduction) :

- Propriétés de la pomme de terre : ps, cps, ks (souvent fonctions de X et T si tu as des corrélations)

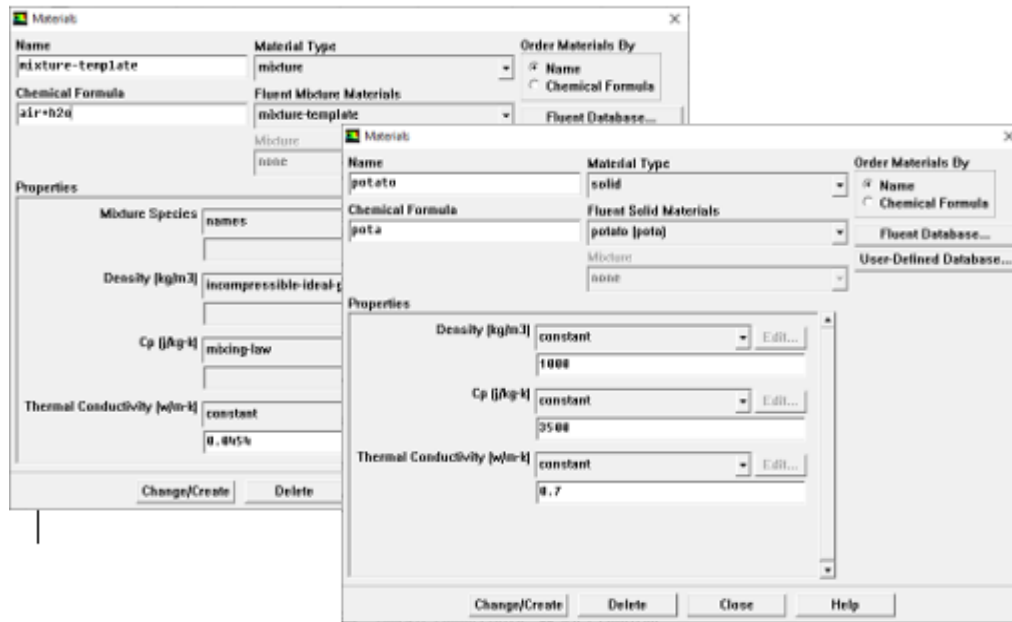


Figure III 14: les Matériaux

Ces propriétés confirment que la teneur en eau initiale et la structure interne influencent fortement la cinétique de séchage et les mécanismes de transfert [9].

III.6 Conditions aux limites (BC)

Comme discuté dans ce travail, les conditions aux limites appliquées au modèle CFD du procédé de séchage comprennent une vitesse d'entrée d'air imposée, une pression de sortie constante, ainsi que des conditions de paroi de type **no-slip** pour toutes les surfaces solides. En outre, des conditions thermiques et de transfert de masse sont définies afin de représenter les échanges de chaleur et d'humidité entre l'écoulement d'air, le produit (pommes de terre) et les parois de la chambre de séchage. Ces conditions aux limites sont essentielles pour reproduire de manière réaliste l'écoulement de l'air, la distribution de la température et le transport de l'humidité au sein du système étudié.

III.6.1 Condition aux limites du transfert de masse

Aux frontières ouvertes, la condition aux limites du transfert de masse basée sur la loi de diffusion de Fick s'écrit :

$$\mathbf{n} \cdot (D_{eff} \nabla Y) = h_m (Y_b - Y) \quad (3.1)$$

Cette condition exprime le flux de matière à la surface du produit, contrôlé par le gradient de l'humidité et par les échanges convectifs avec le milieu extérieur.

III.6.2 Condition à l'entrée

$$\mathbf{u} = U_0 \mathbf{n}$$

La condition à l'entrée est définie par un profil de vitesse uniforme, où U_0 représente la vitesse d'entrée de l'air.

III.6.3 Condition aux limites à la sortie

$$p = 1 \text{ atm}$$

La condition à la sortie est définie par une pression statique imposée égale à la pression atmosphérique, soit $p = 1 \text{ atm}$. Cette condition permet de simuler un écoulement libre vers

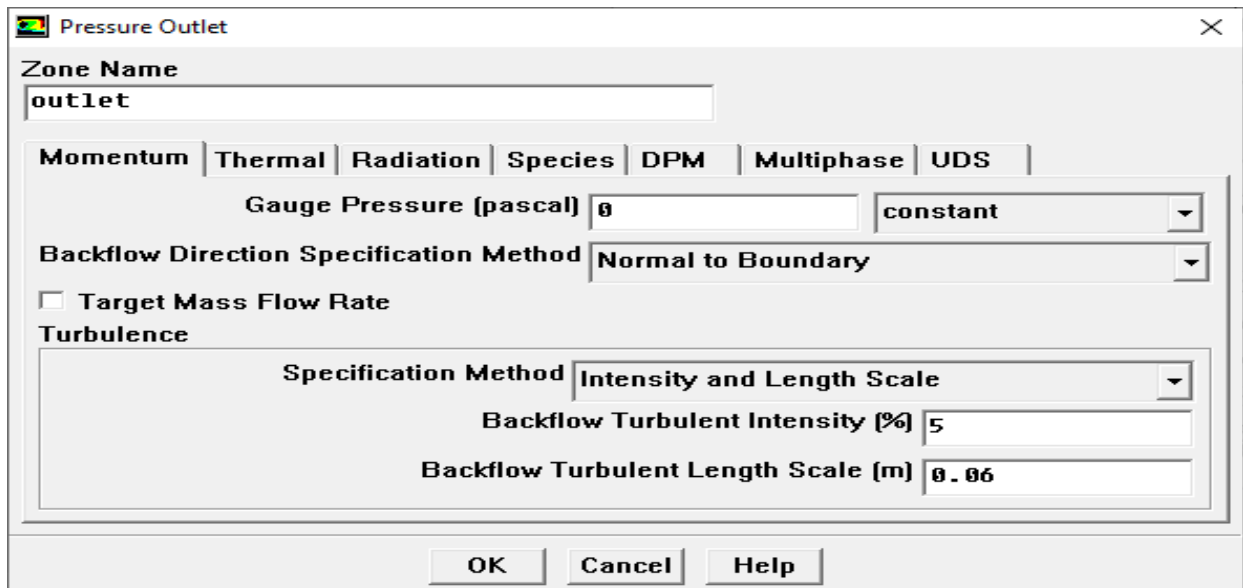


Figure III 15:ourlet paramètre

III.6.4 Conditions aux parois

Dans cette simulation CFD du séchoir à air chaud, les parois de la chambre sont supposées **adiabatiques**, ce qui signifie qu'il n'y a **aucun transfert de chaleur à travers les surfaces**. Elles sont également définies comme des conditions **no-slip**, [10] ce qui impose une vitesse nulle au niveau des parois. Ainsi, les parois servent uniquement à confiner l'écoulement d'air humide et le produit, sans perte de masse ni d'énergie vers l'extérieur. Ces hypothèses permettent de simplifier le modèle tout en conservant une représentation réaliste du comportement de l'écoulement dans le séchoir.

III.6.5 Définition du matériau et modélisation de la pomme de terre

Dans cette étude, la pomme de terre a été modélisée comme un **milieu poreux homogène** afin de représenter les phénomènes macroscopiques de transfert de chaleur et de masse au cours du séchage. [11]

Cette approche ne vise pas à reproduire la microstructure réelle du produit, mais à décrire les échanges thermiques et hydriques entre l'air chaud et la pomme de terre sous différentes conditions de fonctionnement. Elle permet notamment d'étudier l'influence de la température et de la vitesse de l'air de séchage sur la cinétique de séchage, tout en limitant la complexité du modèle numérique et le temps de calcul. Cette approche est largement utilisée dans la modélisation des matériaux biologiques poreux.

La pomme de terre n'étant pas disponible dans la bibliothèque des matériaux de **ANSYS Fluent 6.3.26**, un nouveau matériau nommé **Potato** a été créé dans le menu

Define → Materials. Les propriétés thermo physiques utilisées dans la simulation sont présentées dans le Tableau III.2. [12]

Tableau III.1. Propriétés thermo physiques de la pomme de terre utilisées dans la simulation

Propriété	Symbole	Valeur	Unité
Masse volumique	ρ	1000	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Chaleur spécifique	C_p	3500	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Conductivité thermique	k	0,40	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Diffusivité thermique	α	$\sim 10^{-7}$	m^2/s

Tableau III 2 : Paramètres du milieu poreux pour les tranches de pommes de terre ($5 \times 1 \text{ cm}$)

Ces propriétés ont ensuite été affectées à la zone représentant la pomme de terre dans **Cell Zone Conditions**.

Afin de représenter la résistance du produit à l'écoulement de l'air, cette zone a été définie comme un **milieu poreux (Porous Zone)** [13]. Le modèle de Darcy–Forchheimer est utilisé par Fluent pour introduire les pertes de charge dans les équations de quantité de mouvement :

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} u_i + \frac{1}{2} C_2 \rho |\mathbf{u}| u_i\right) \quad (3.2)$$

Où S_i est le terme source, α la perméabilité, C_2 le coefficient de résistance inertielle, μ la viscosité dynamique, ρ la masse volumique du fluide et u_i la composante de la vitesse. [14]

Les paramètres **Porosité**, **Viscose Resistance** et **Inertiel Resistance** ont été définis dans **Cell Zone Conditions → Porous Zone**. Les coefficients de résistance visqueuse et inertielle ont été

ajustés progressivement au cours des simulations afin d'obtenir un comportement numérique en bon accord avec les résultats de référence publiés par **S. Das et al.** Cette procédure de

Calibration est couramment utilisée lorsque les propriétés hydrodynamiques exactes du milieu poreux ne sont pas disponibles expérimentalement. [15]

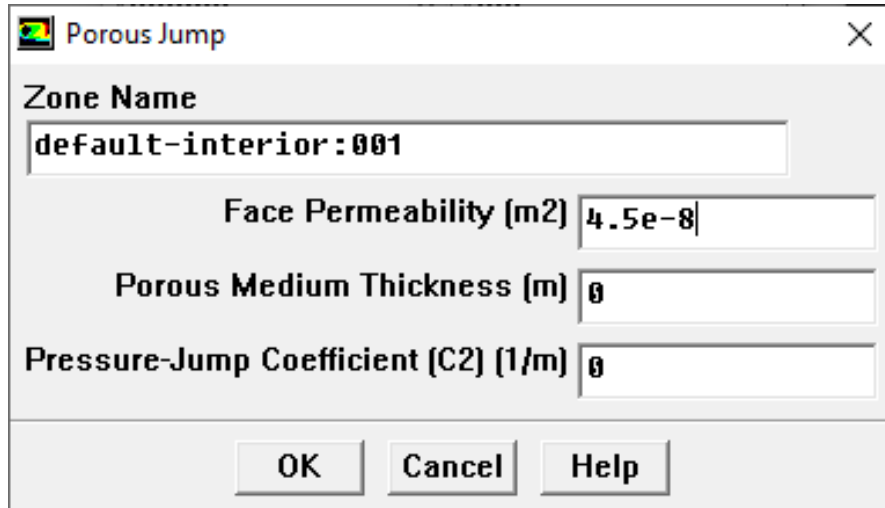


Figure III 16 Perméabilité

III.7 Initial Condition

Élément	Paramètre	Valeur / Expression
Air	Température initiale	318.15 K – 333.15°C
	Fraction massique d'eau DANS L'air	1.0×10^{-3} – 1.0×10^{-4} kg eau/kg
	Vitesse d'entrée	0.5 – 2.0 m/s
	Densité	1.225 kg/m ³
Chambre de séchage	Largeur	0.27 m
	Hauteur	0.34 m
	Profondeur	0.28 m
Échantillons (pomme de terre)	Température initiale	Standard
	Température initiale	305 K - 31,85°C
	Humidité initiale (base sèche)	2.33 kg eau/kg solide
	Fraction massique d'eau (patch Fluent)	0.75 kg eau/kg
Propriétés thermo-physiques	Diamètre équivalent	0.05 m
	Épaisseur	0.01 m
	Densité	1000 kg/m ³
	Chaleur spécifique	3500 J/kg·K
	Conductivité thermique	0.4 W/m·K

Tableau III 3: Conditions initiales et paramètres de simulation du séchage (pomme de terre)

III.8 Définition des lignes de surveillance pour le suivi de la température

Afin d'analyser l'évolution de la température au cours du séchage, trois lignes de surveillance (monitoring lines) ont été définies à différentes hauteurs de la chambre de séchage. Ces lignes permettent d'observer et de comparer la distribution thermique ainsi que sa variation temporelle dans différentes zones du séchoir.

Les lignes ont été créées à l'aide de l'outil **Surface** → **Line/Rake** dans ANSYS Fluent 6.3.26 selon les coordonnées suivantes :

Ligne	Point de départ (x, y) [cm]	Point d'arrivée (x, y) [cm]
Line 1	(0 ; 27)	(27 ; 27)
Line 2	(0 ; 17)	(27 ; 17)
Line 3	(0 ; 8)	(27 ; 8)

Tableau III 4 : Ligne Point

Ces lignes correspondent respectivement aux parties supérieure, médiane et inférieure du séchoir, permettant ainsi d'évaluer l'uniformité de la distribution de la température pendant le processus de séchage.

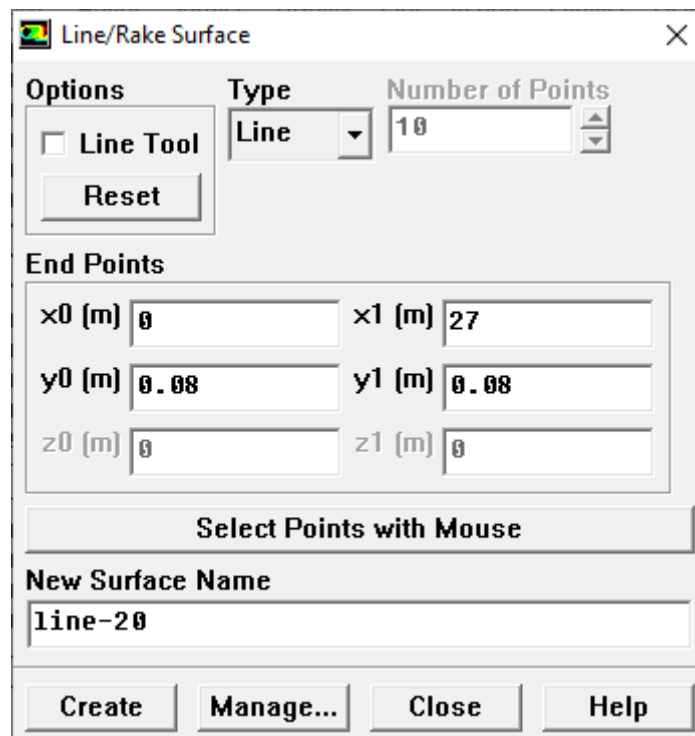


Figure III 17 ; line surface

III.9 Choix des facteurs de sous relaxation et de Résidu et l'initialisation

1. Solve → initialisé → initialisé

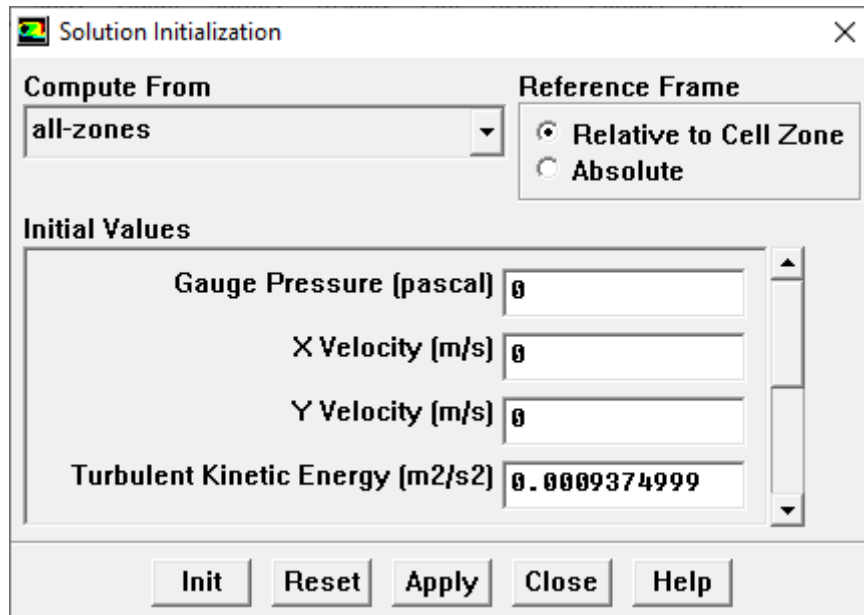


Figure III 18 : l'initialisation.

2. Solve → initialise → patch

- Température initiale de pomme de terre = 305
- La fraction massique de H2O dans pomme de terre = 7.5 kg /kg

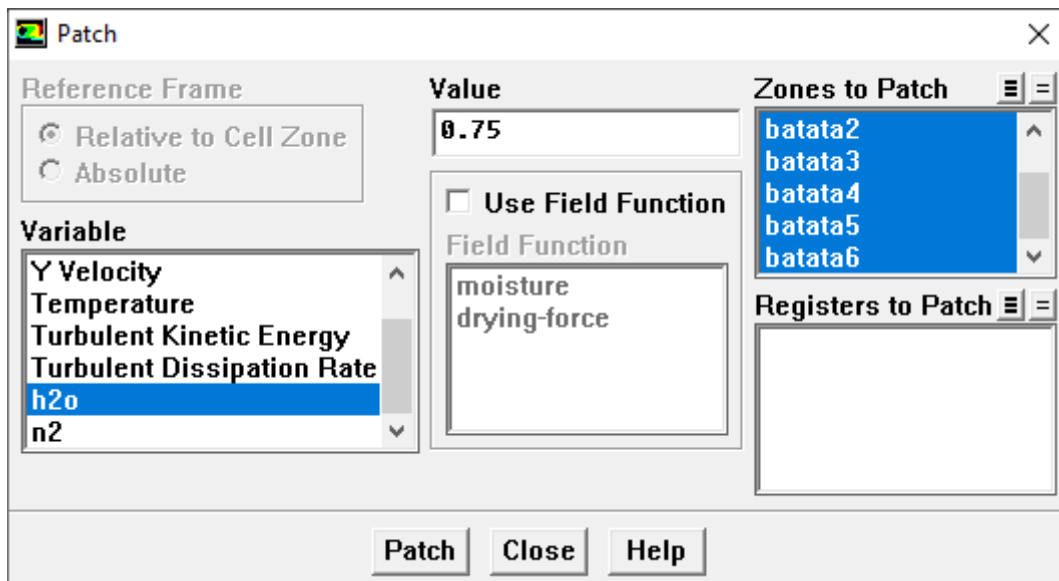


Figure III 19:patch

III.10 Discrétisation des équations

Les équations (3.1) à (3.8) sont discrétisées par la méthode des volumes finis. Les termes convectifs sont approchés à l'aide du schéma **Second-Order Upwind**, tandis que les gradients sont évalués par la méthode **Green–Gauss Cell-Based**.

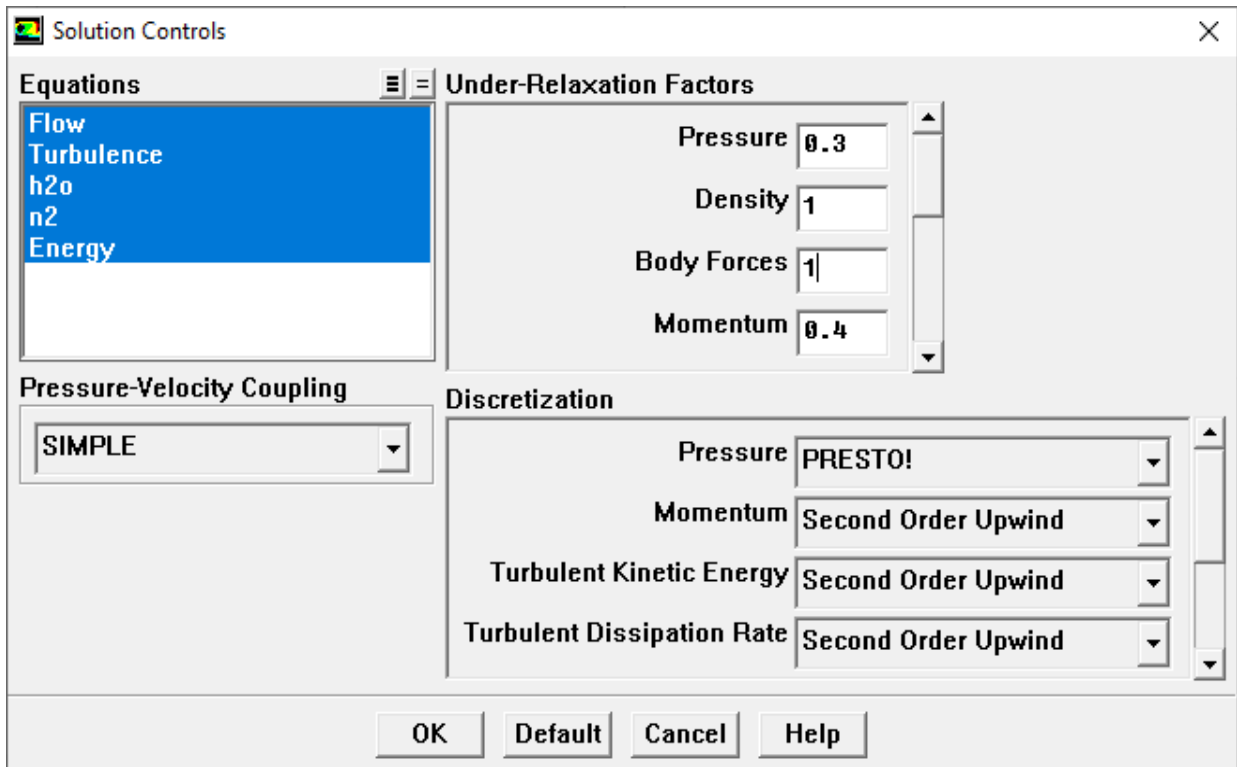


Figure III 20: solutions contrôlées

III.10.1. Pas de temps et nombre de Courant (CFL)

Le choix du pas de temps pour la simulation transitoire a été effectué sur la base du critère de stabilité de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL), afin d’assurer la stabilité numérique et la précision du calcul. En considérant la taille caractéristique minimale du maillage, estimée à environ $\Delta x \approx 5 \times 10^{-3} \text{ m}$, et une vitesse d’entrée de l’air variant entre 0,5 m/s et 2 m/s, le pas de temps maximal permettant de respecter la condition $\text{CFL} \leq 1$ est donné par : 0.5 (s)

III.10.2 Calcul de la teneur en humidité (moisture content)

Chaque moniteur est défini dans :

Solve → Monitors → volume. →. Report Définitions → Volume Average → Mass Fraction of H₂O.

III.10.3 Résultat attendu

Les résultats montrent une diminution progressive de la teneur en eau dans toutes les pommes de terre, avec une vitesse de séchage plus élevée pour celles situées près de l'entrée d'air (bat1) et plus faible pour celles situées en aval (bat6).

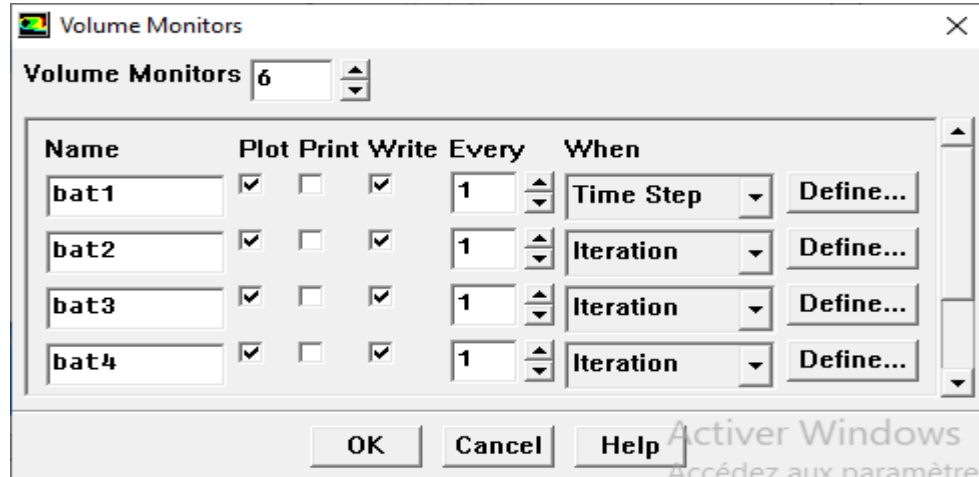


Figure III 21 : Résultat attendu

Cette méthode permet de quantifier précisément la cinétique de séchage et de comparer le comportement des différentes zones du produit. Elle constitue un indicateur essentiel pour l'analyse du transfert de masse dans le milieu poreux.

III.11 d'expériences paramétriques (vitesse – température)

Le Tableau 3.1 présente le plan d'expériences numériques utilisé pour analyser l'effet combiné de la vitesse de l'air et de la température sur le processus de séchage. Les températures sont exprimées en degrés Celsius et Kelvin afin d'assurer la compatibilité avec les modèles thermodynamiques utilisés dans ANSYS Fluent. Cette conversion est essentielle pour les équations de transfert thermique basées sur l'échelle absolue

Cas	Vitesse de l'air (m/s)	Température (°C)	Température (K)	Fraction massique d'eau dans l'air entre
1	0.5	40	(318.15 K)	1.0×10^{-3} kg eau/kg
				1.0×10^{-4} kg eau/kg
2	1	40	(318.15 K)	-----
3	2	50	(318.15 K)	-----
4	Meilleur résultat	50	(323.15 K)	-----
5	Meilleur résultat	60	(333.15 K)	-----

Tableau III 5 Cas de simulation vitesse et température.

Conclusion

Dans ce chapitre, la méthodologie numérique adoptée pour la simulation du séchage des pommes de terre a été présentée en détail. Deux configurations de séchoir ont été étudiées afin d'évaluer leur comportement thermique et hydrodynamique. La géométrie des différents domaines a été réalisée à l'aide de GAMBIT 2.3.16, tandis que les simulations numériques ont été effectuées avec ANSYS Fluent 6.3.26. [16]

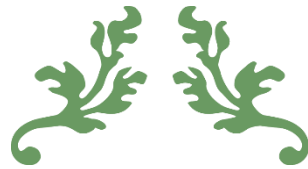
Les conditions initiales et aux limites ont été définies en tenant compte des paramètres réels de fonctionnement du séchoir, notamment la température, la vitesse de l'air et les fractions massiques des espèces. Six échantillons de pommes de terre ont été intégrés dans le domaine de calcul avec leurs caractéristiques géométriques et physiques afin de reproduire au mieux les conditions réelles du procédé de séchage.

Par ailleurs, les équations mathématiques présentées dans le chapitre précédent ont été intégrées dans les différentes étapes de la modélisation numérique. Le choix des modèles physiques, du maillage, des méthodes de résolution et des paramètres de calcul a été effectué de manière à assurer une représentation aussi réaliste que possible du phénomène étudié.

L'ensemble de ces étapes constitue une base solide pour l'analyse et l'interprétation des résultats qui seront présentés dans le chapitre suivant. Les simulations réalisées permettront d'évaluer la distribution de la température, de l'humidité et de la vitesse de l'air à l'intérieur du séchoir, ainsi que leur influence sur les performances du procédé de séchage des pommes de terre

Références bibliographiques de chapitre III

- [1] Versteeg HK, Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2nd ed. Pearson Education; 2007.
- [2] Patankar SV. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing Corporation; 1980.
- [3] Ferziger JH, Perić M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd ed. Springer; 2002.
- [4] ANSYS Inc. *ANSYS Fluent 6.3 User's Guide*. Canonsburg, PA; 2006.
- [5] Moukalled F, Mangani L, Darwish M. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*. Springer; 2016.
- [6] H.K. Versteeg & W. Malalasekera – An Introduction to Computational Fluid Dynamics
- [7] J.D. Anderson – Computational Fluid Dynamics : The Basics with Applications
- [8] Kouhila M. *Étude expérimentale et modélisation du séchage convectif des produits agroalimentaires*. Thèse de doctorat. Marrakech: Université Cadi Ayyad; 2001. p. 80–120.
- [9] F. Faule, *Application of Fluent in Biomass Drying Simulation*, Master's Thesis, Politecnico di Torino, Master's Degree in Energy and Nuclear Engineering N. Parmentier, October 2024, p. 66.
- [10] Dalcin, L. et al., *Conservative and entropy stable solid wall boundary conditions for the compressible*
- [11] J Datta, A. K. (2007). *Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes*. Journal of Food Engineering, 80(1), 80–95.
- [12] Mujumdar AS. *Handbook of Industrial Drying*. 4th ed. CRC Press; 2014.
- [13] Geankoplis CJ. *Transport Processes and Separation Process Principles*. 4th ed. Prentice Hall; 2003.
- [14] Bird RB, Stewart WE, Lightfoot EN. *Transport Phenomena*. 2nd ed. John Wiley & Sons; 2002.
- [15] Incropera FP, DeWitt DP, Bergman TL, Lavine AS. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 7th ed. John Wiley & Sons; 2011.
- [16] Ali et al. *Votre article de référence sur le séchage de la pomme de terre*



Chapitre IV : Résultats et discussion



IV.1 : Introduction

Les études numériques et les simulations réalisées dans ce travail ont permis de visualiser et d'analyser le procédé de séchage de la pomme de terre dans un séchoir ventilé alimenté par de l'air chaud. Afin d'évaluer l'influence des paramètres de fonctionnement sur le séchage convectif de la pomme de terre, une étude paramétrique a été réalisée. Les simulations CFD ont été effectuées en faisant varier la température de l'air de séchage (45, 50 et 60 °C), la vitesse d'entrée de l'air (0,5 ; 1 et 2 m/s) ainsi que l'humidité absolue de l'air (0,0001 et 0,0212 kg d'eau/kg d'air sec). La pomme de terre est considérée comme un milieu poreux contenant initialement une fraction massique d'eau de 0,75. L'objectif est d'analyser l'influence de ces paramètres sur les transferts de chaleur et de masse au cours du séchage. Cependant, ce mémoire ne représente qu'une première approche numérique du problème. Il ouvre la voie à des études plus approfondies visant à améliorer la précision des modèles, à optimiser les conditions de séchage et à mieux comprendre les mécanismes physiques complexes liés au transfert hygrothermique dans les produits agricoles.

IV. 2 : Cadre de simulation

Le cadre de simulation utilisé pour le développement du modèle est illustré sur la Fig. 2. Il montre que les propriétés thermo physiques dépendantes de la teneur en humidité, ainsi que les paramètres de transfert de masse dépendants de la température, sont mises à jour au début de chaque itération afin de prendre en compte le caractère couplé et non linéaire du processus de séchage.

- Le modèle CFD du séchage a été développé et simulé à l'aide du logiciel **ANSYS Fluent 6.3.26**, tandis que la génération de la géométrie et du maillage a été effectuée sous **GAMBIT 2.3.16**. Cette approche numérique permet de représenter l'écoulement de l'air chaud dans le séchoir ventilé ainsi que les phénomènes couplés de transfert de chaleur et de masse au sein du produit, tout en assurant une évolution réaliste des champs de température et de la fraction massique de l'eau au cours du temps.

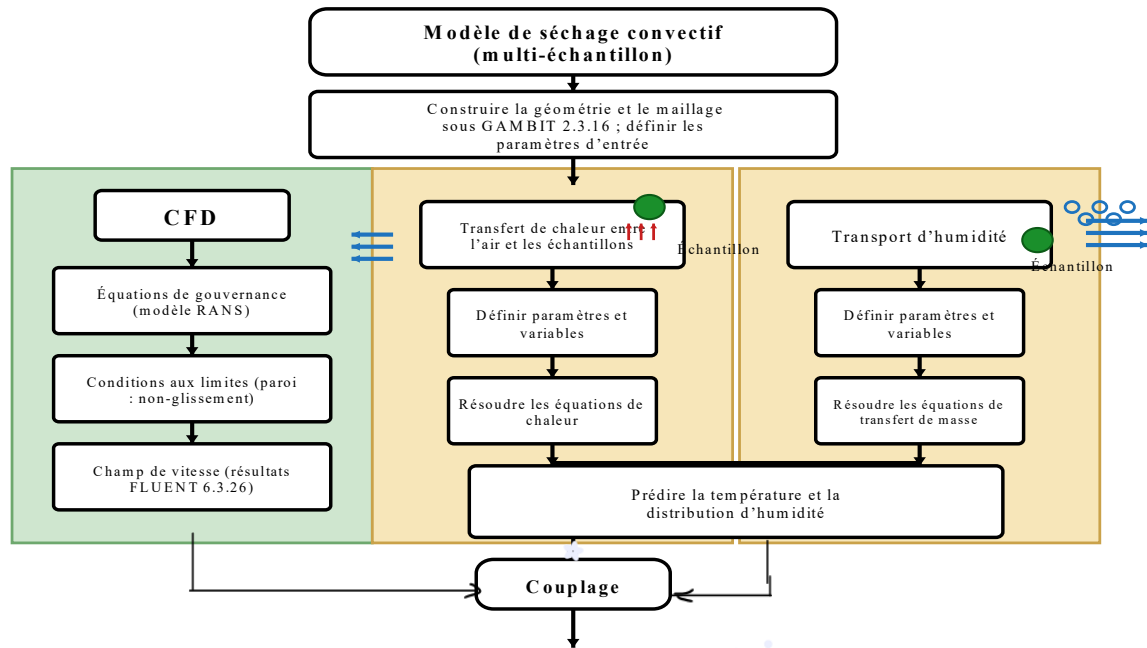


Figure IV 1:Schéma du cadre de développement et de couplage du modèle CFD de séchage

IV.3 Validation du modèle

La Figure IV.3 présente l'évolution de la fraction massique moyenne d'eau dans la pomme de terre au cours du séchage. On observe une diminution progressive de la teneur en eau, traduisant le transfert continu de l'humidité du produit vers l'air chaud. Au début du procédé, la vitesse de séchage est élevée en raison de la forte quantité d'eau disponible à la surface et de l'important gradient de concentration entre le produit et l'air de séchage. Par la suite, la pente de la courbe diminue progressivement, ce qui indique un ralentissement du transfert de masse. Ce comportement s'explique par la diminution de l'eau libre dans le produit et par la prédominance du transport de l'humidité depuis l'intérieur de la pomme de terre vers sa surface. Cette évolution est conforme à la cinétique de séchage présentée au Chapitre II, où le procédé est caractérisé par une phase initiale de séchage rapide suivie d'une phase à vitesse décroissante, contrôlée principalement par les mécanismes de diffusion interne.

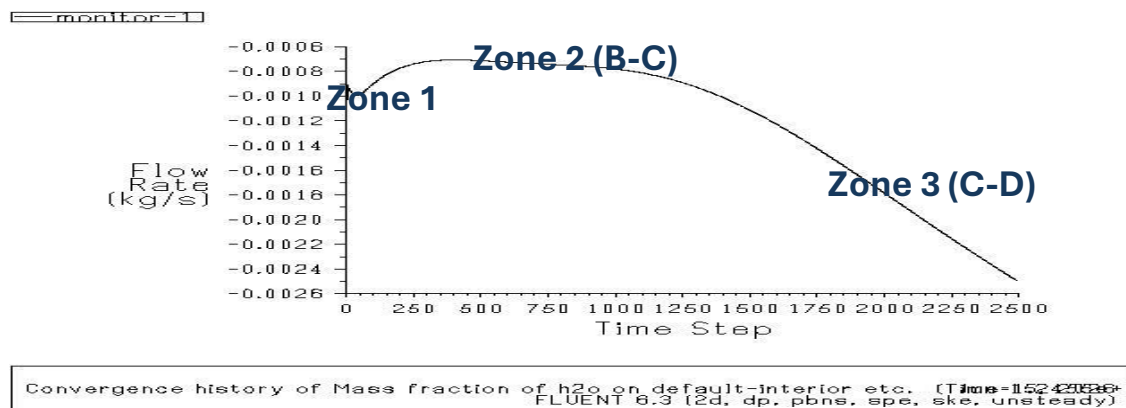


Figure IV 2: Évolution de la fraction massique moyenne d'eau dans la pomme de terre au cours du séchage convectif.

Figure IV 2 Il convient toutefois de souligner que la durée de séchage prédite par le modèle numérique est plus courte que celle rapportée dans les études expérimentales de la littérature. Cette différence s'explique par les hypothèses simplificatrices adoptées dans le modèle CFD, notamment la représentation de la pomme de terre comme un milieu poreux homogène, l'absence de prise en compte du retrait du produit et la simplification du transfert interne de l'humidité. Par conséquent, l'objectif principal de cette étude n'est pas de reproduire exactement les résultats expérimentaux, mais d'analyser de manière comparative l'influence de la température de l'air, de la vitesse d'écoulement et de l'humidité initiale de l'air chaud sur la cinétique de séchage et les transferts de chaleur et de masse.

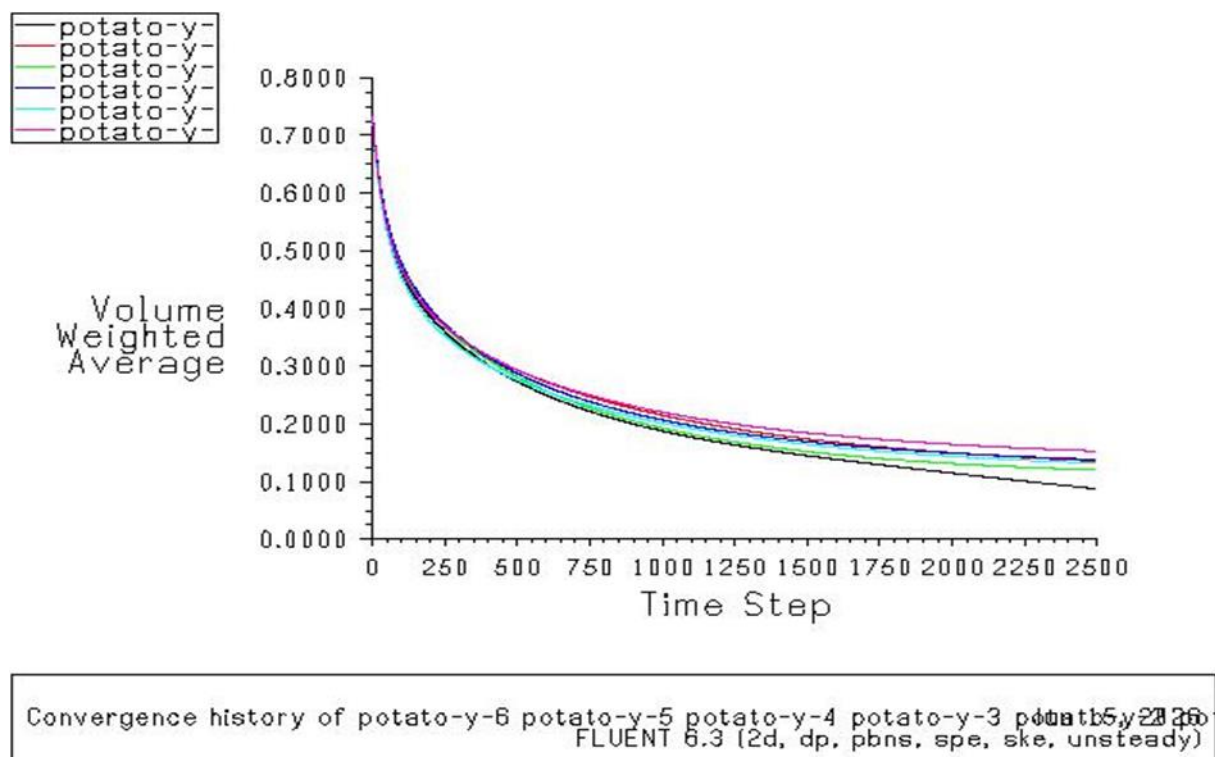


Figure IV 3: Comparaison de l'évolution de la fraction massique moyenne d'eau de la pomme de terre.

IV.4 Effet de la température de l'air de séchage.

IV4.1 Effet de la température de l'air

a vitesse= 0,5 m/s après 15.3 min

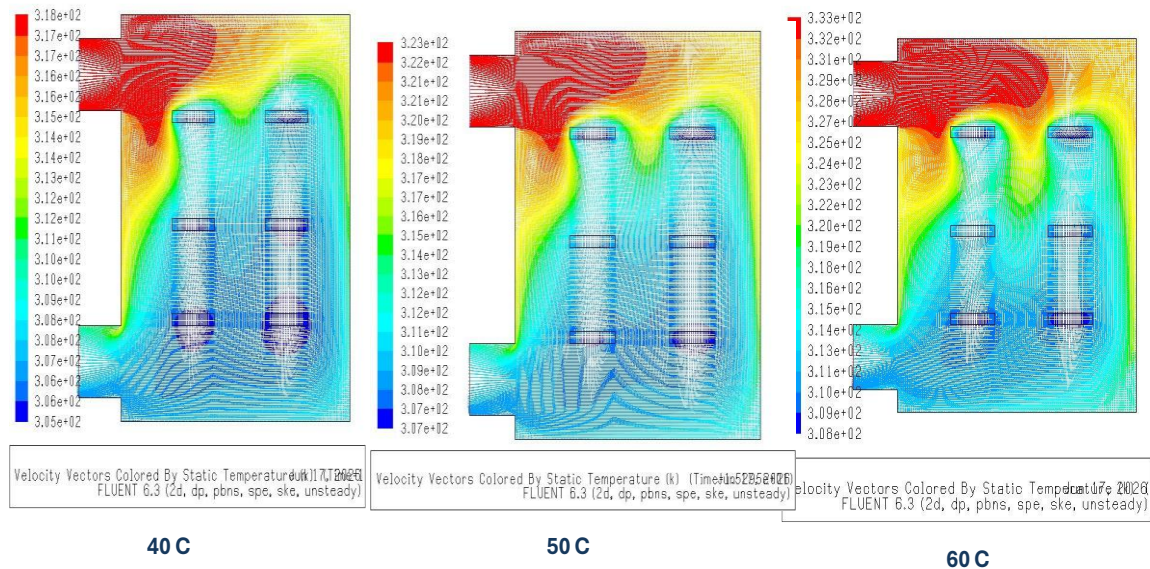


Figure IV 4: Distribution des vecteurs de vitesse et du champ de température dans la chambre de séchage pour différentes températures de l'air (40, 50 et 60 °C) à une vitesse d'entrée de 0,5 m/s après 15,3 min de séchage.

La Figure IV.5 présente la distribution des vecteurs de vitesse et du champ de température dans la chambre de séchage pour des températures d'entrée de 40, 50 et 60 °C, à une vitesse d'air constante de 0,5 m/s après 15,3 min de séchage. Les résultats montrent que l'écoulement de l'air est fortement influencé par la géométrie de la chambre et par la présence des échantillons de pomme de terre, ce qui entraîne la formation de zones de recirculation en aval des produits. À mesure que la température de l'air augmente, le niveau thermique autour des échantillons devient plus élevé, ce qui favorise le transfert de chaleur vers le produit et accélère l'évaporation de l'eau. Les vecteurs de vitesse indiquent que la répartition de l'écoulement reste globalement similaire pour les trois cas, tandis que les différences observées concernent principalement le champ de température. Ces résultats confirment que l'augmentation de la température de l'air améliore les conditions de séchage en intensifiant les transferts thermiques, ce qui est en accord avec les tendances observées sur la cinétique de séchage.

IV4.2 Influence de la température d'entrée sur l'état final du produit

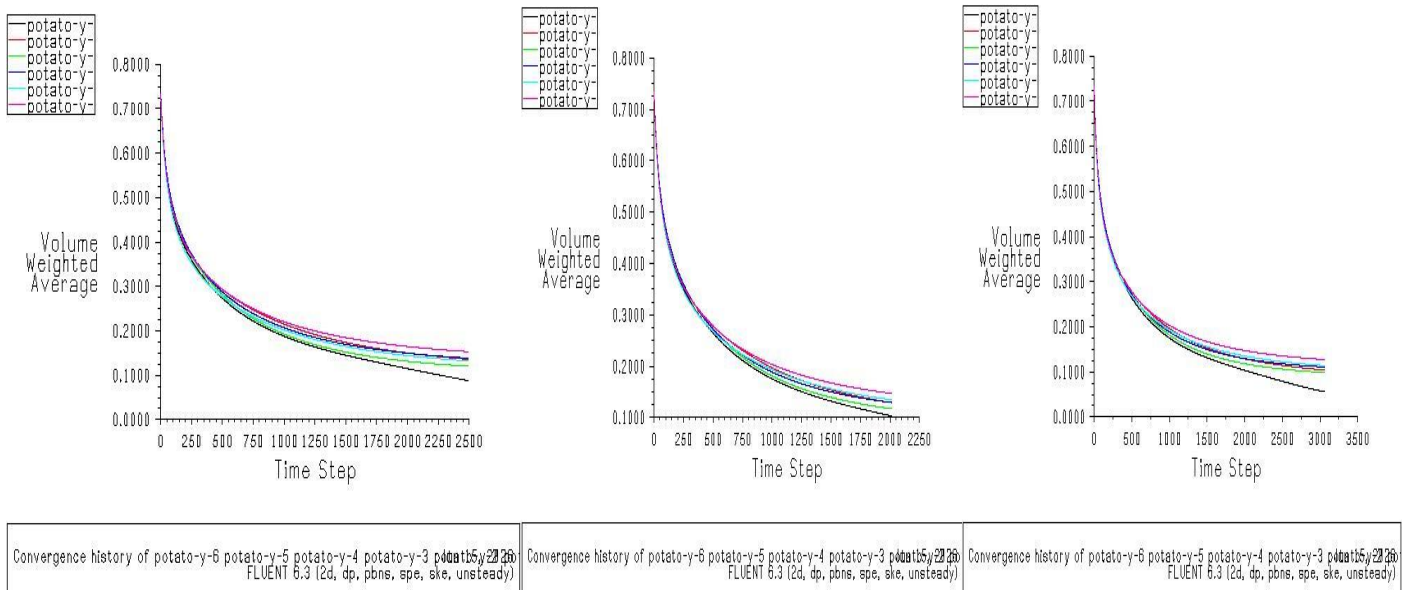


Figure IV 5: influence de la température de l'air chaud sur la qualité finale du produit

Sur cette figure, on observe que l'augmentation de la température de l'air de séchage de 45°C à 50°C puis à 60°C, à une vitesse d'entrée constante de 0,5 m/s, accélère la diminution de la teneur en eau du produit. Le premier échantillon de pomme de terre atteint une teneur en eau de 0,1 kg eau/kg matière sèche après environ 11,3 min à 45°C, 10,75 min à 50°C et seulement 10 min à 60°C.

Cela montre que la vitesse de séchage augmente avec la température. En effet, une température plus élevée fournit davantage d'énergie thermique au produit, ce qui favorise l'évaporation de l'eau à la surface. En parallèle, le gradient de pression de vapeur entre le produit et l'air devient plus important, ce qui intensifie le transfert de masse.

On remarque également que l'écart entre les courbes reste relativement limité. Cela indique que le séchage se déroule principalement en régime décroissant, où le phénomène est contrôlé par la diffusion de l'humidité à l'intérieur de la pomme de terre. Ainsi, même si l'augmentation de la température améliore les transferts externes, la migration interne **de l'eau demeure le mécanisme limitant.**

IV4.3 Évolution couplée de la teneur en eau et de la température pendant le séchage

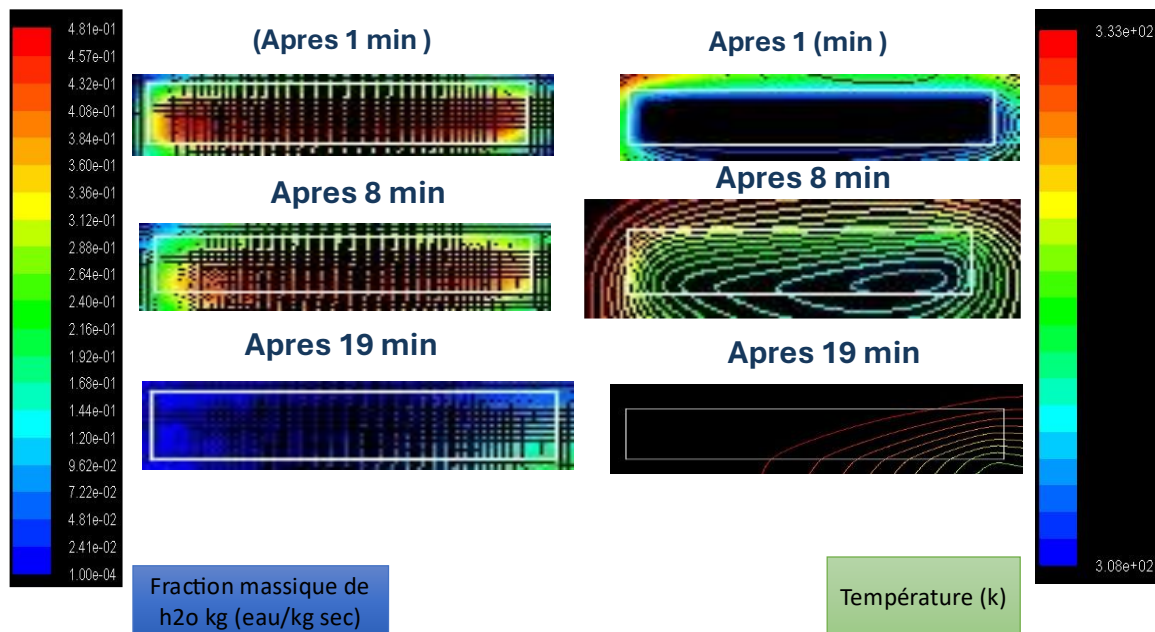


Figure IV 6: Évolution couplée de la teneur en eau et de la température pendant le séchage

Cette figure présente l'évolution simultanée de la teneur en eau et de la température à l'intérieur de l'échantillon au cours du séchage.

Après **1 minute**, le produit contient encore une grande quantité d'eau, environ **0,5 kg d'eau par kg de matière sèche**. La température est principalement localisée à la surface, ce qui montre que la chaleur n'a pas encore pénétré dans le cœur du produit.

Après **8 à 9 minutes**, la chaleur se propage progressivement à l'intérieur de l'échantillon. Cette augmentation de température favorise l'évaporation de l'eau, ce qui entraîne une diminution de la teneur en eau jusqu'à environ **0,3 kg d'eau par kg de matière sèche**.

Après **19 minutes**, la chaleur est répartie dans l'ensemble du produit et la température atteint environ **330 K**. La majeure partie de l'eau a été évaporée, ce qui indique un produit presque sec. Cette évolution met en évidence le couplage entre le transfert de chaleur et le transfert de masse pendant le séchage convectif.

IV.4.3 Conclusion 1

Afin d'évaluer l'influence de la température sur le procédé de séchage, trois températures de l'air ont été étudiées : 45 °C, 50 °C et 60 °C, tandis que les autres paramètres de fonctionnement ont été maintenus **constants**. Les résultats de la simulation CFD montrent qu'une augmentation de la température de l'air accélère le processus de séchage. Les résultats montrent. En effet, lorsque la température augmente, le gradient thermique entre l'air chaud et la surface de la pomme de terre devient plus important, ce qui favorise le transfert de chaleur et augmente le taux d'évaporation de l'eau. Par conséquent, la teneur en eau diminue plus rapidement et le temps nécessaire pour atteindre l'état final de séchage est réduit. Cette tendance est en accord avec les résultats rapportés dans la littérature, où une augmentation de la température entraîne une amélioration des performances du séchage convectif.[1]

IV.5 Effet de la vitesse

IV.5.1 Influence de la vitesse de l'air sur l'écoulement

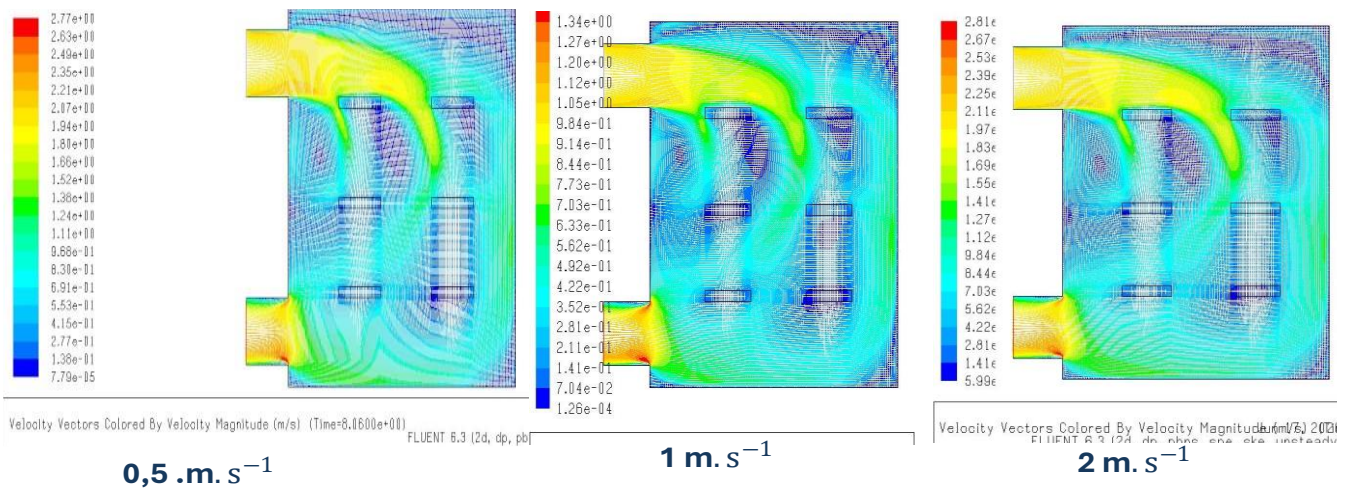


Figure IV 7: Distribution des lignes de vitesse à 60°C courant et zones de recirculation de l'air chaud dans le séchoir Résultats Fluent après 15.3 min

la Figure IV.6 montre que la structure générale des lignes de courant reste pratiquement identique pour les trois vitesses d'entrée étudiées (0,5 ; 1 et 2 m/s). La géométrie de la chambre de séchage et la présence des échantillons de pomme de terre imposent un schéma

d'écoulement similaire, caractérisé par la formation de zones de recirculation autour des produits. En revanche, l'augmentation de la vitesse d'entrée intensifie l'écoulement de l'air chaud, ce qui améliore les échanges convectifs entre l'air et la surface des échantillons.

IV.5. 2 Influence de la vitesse de l'air sur le champ thermique et l'écoulement.

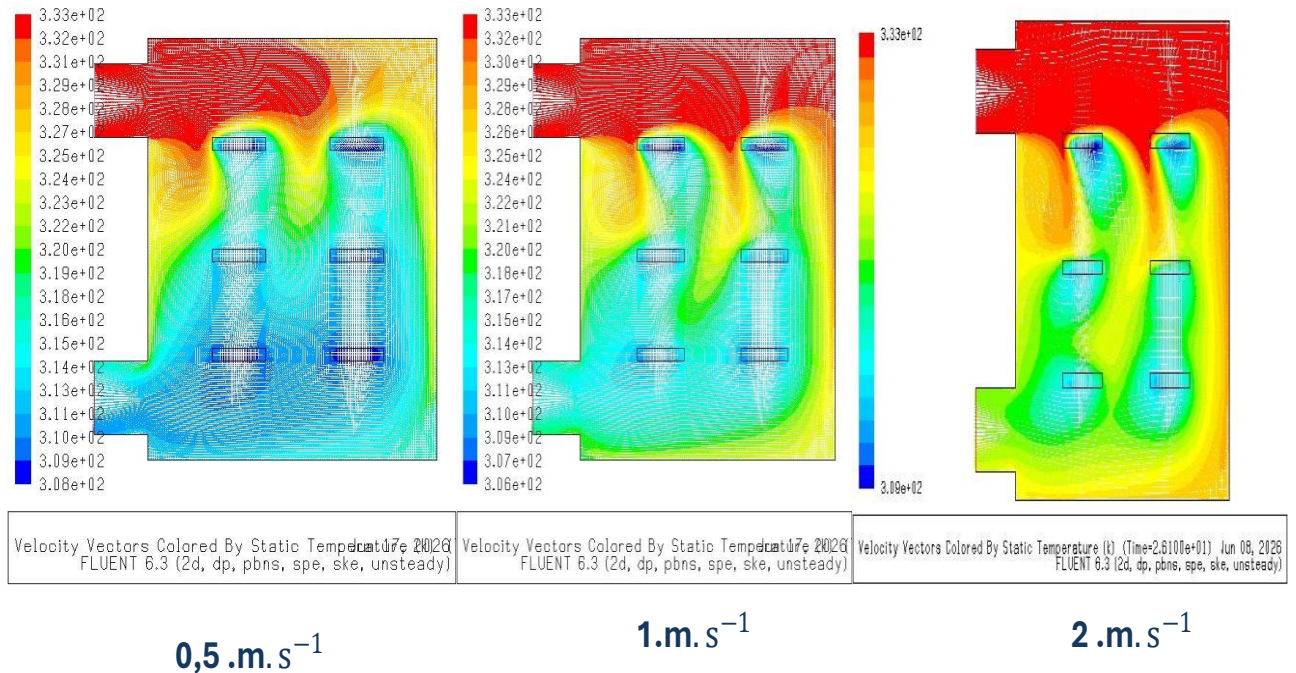


Figure IV 8: Distribution des vecteurs de vitesse colorés par la température statique pour différentes vitesses d'entrée de l'air (0,5 ; 1 et 2 m/s) à 60 °C après 15,3 min de séchage

La **Figure IV8** présente la distribution des vecteurs de vitesse colorés par la température statique dans la chambre de séchage pour trois vitesses d'entrée de l'air (0,5 ; 1 et 2 m/s), à une température de 60 °C après 15,3 min de séchage. Les résultats montrent que l'augmentation de la vitesse d'entrée modifie sensiblement la structure de l'écoulement à l'intérieur de la chambre. À faible vitesse (0,5 m/s), l'air circule plus lentement autour des échantillons de pomme de terre, ce qui favorise la formation de zones de recirculation et limite les échanges convectifs. En augmentant la vitesse à 1 m/s puis à 2 m/s, l'écoulement devient plus énergétique et la pénétration de l'air chaud entre les échantillons est améliorée.

IV.5.3 Influence de la vitesse d'entrée sur les profils de vitesse le long des lignes de mesure

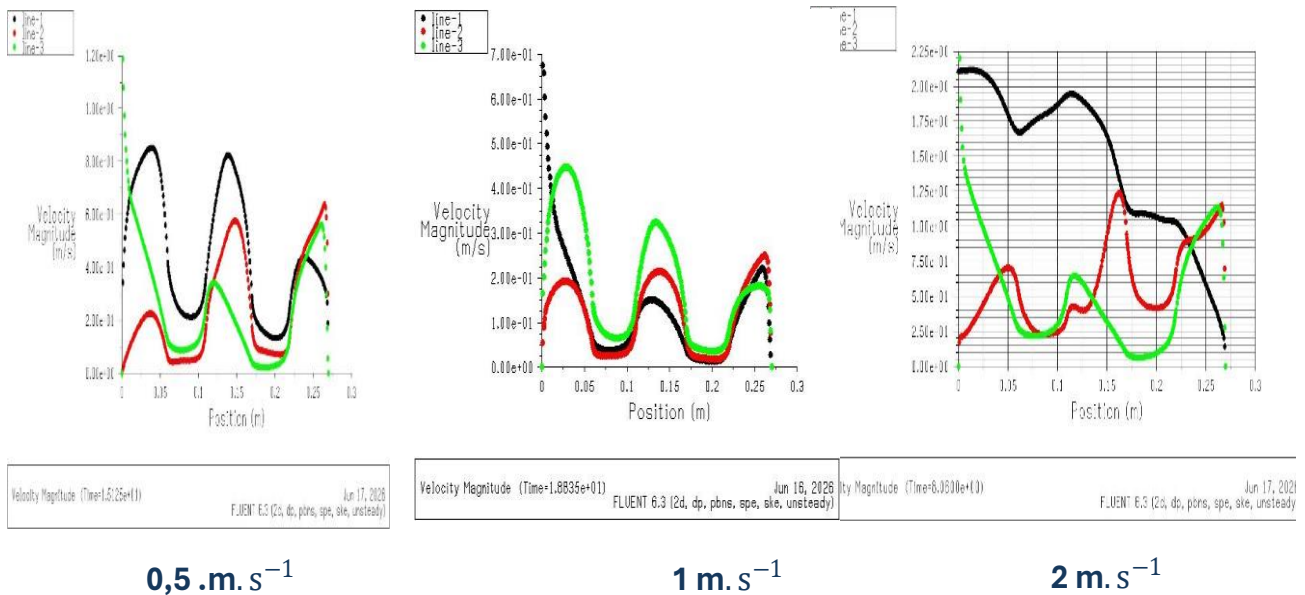


Figure IV 9 : Évolution de la vitesse de l'air le long des lignes de mesure supérieure (Ligne 1), médiane (Ligne 2) et inférieure (Ligne 3) pour différentes vitesses d'entrée (0,5 ; 1 et 2 m/s) après 15,3 min de simulation

Ainsi, bien que l'augmentation de la vitesse d'entrée améliore généralement les transferts de chaleur et de masse, elle peut également réduire l'uniformité de la distribution de l'air à l'intérieur du séchoir. Les échantillons placés dans la région 1 sont alors soumis à des conditions de séchage plus intenses que ceux situés dans les régions 2 et 3, ce qui peut conduire à une hétérogénéité du séchage.

IV.5.4 Influence de la vitesse d'entrée sur l'état final du produit

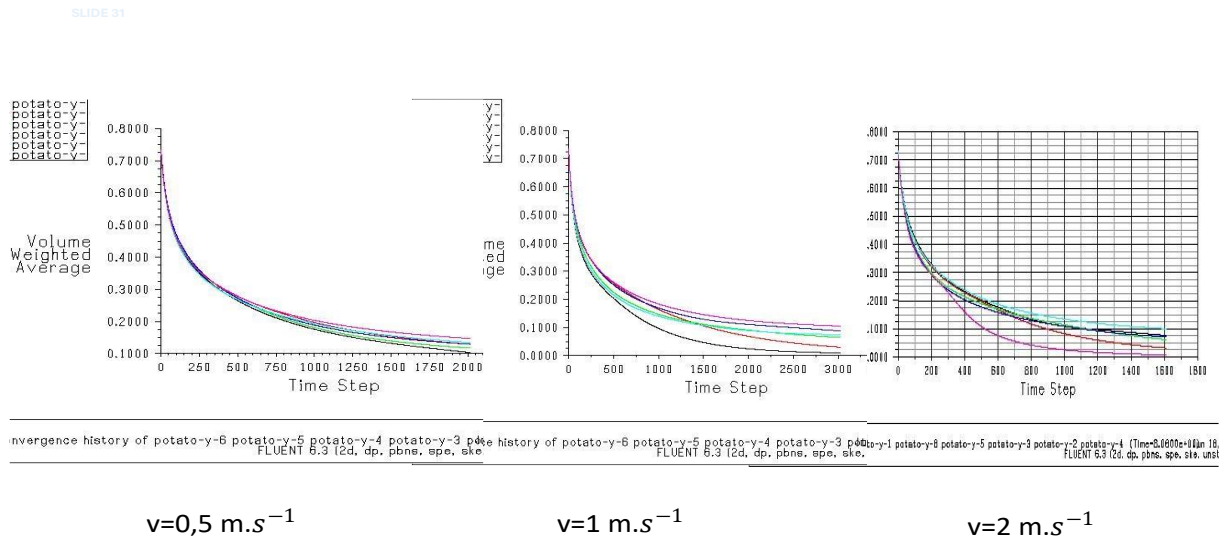


Figure IV 10: Influence de la vitesse d'entrée sur l'état final du produit

Les résultats obtenus **Figure IV10** montrent que la vitesse d'entrée de l'air a un impact direct sur la cinétique de séchage ainsi que sur l'uniformité de la distribution de l'humidité dans le séchoir.

- Pour une vitesse faible (0,1 m/s), le transfert convectif est limité, ce qui entraîne un séchage plus lent. Après 10 minutes, le premier échantillon atteint environ 86 % de séchage, mais les différences entre les différents échantillons restent faibles, ce qui indique une meilleure homogénéité du champ d'écoulement et des échanges thermiques plus uniformes.

- Lorsque la vitesse augmente à 1 m/s, le coefficient de transfert de chaleur et de masse augmente, ce qui accélère significativement le séchage. Dans ce cas, le premier échantillon atteint l'état sec plus rapidement (environ 15 minutes). Cependant, l'écoulement devient plus hétérogène, ce qui induit des différences plus marquées entre les zones proches de l'entrée et celles plus éloignées.

- À une vitesse plus élevée (2 m/s), l'effet convectif est encore plus intense. Le premier échantillon atteint 100 % de séchage en environ 9 minutes, ce qui confirme une augmentation de la vitesse de transfert. Toutefois, cette augmentation s'accompagne d'une forte non-uniformité du champ d'écoulement : les régions proches de l'entrée bénéficient d'un flux d'air chaud plus important, entraînant un séchage très rapide voire un sur-séchage local, tandis que les zones plus éloignées restent relativement moins affectées.

Ainsi, l'augmentation de la vitesse d'entrée améliore la rapidité globale du séchage, mais réduit l'homogénéité du procédé. Le compromis entre cinétique de séchage et uniformité doit donc être pris en compte dans l'optimisation du fonctionnement du séchoir.

IV.5.5 Conclusion 2

Afin d'étudier l'influence de la vitesse de l'air sur le séchage convectif de la pomme de terre, trois vitesses d'entrée ont été considérées : **0,5 ; 1 et 2 m/s**, tandis que les autres paramètres de fonctionnement ont été maintenus constants. Les résultats numériques montrent qu'une augmentation de la vitesse de l'air entraîne une diminution de la fraction massique d'eau au cours du temps, traduisant une accélération du processus de séchage. En effet, une vitesse d'air plus élevée améliore les échanges convectifs à la surface du produit, réduit l'épaisseur de la couche limite et augmente le coefficient de transfert de chaleur et de masse. Par conséquent, le transfert d'humidité de la pomme de terre vers l'air devient plus important, ce qui réduit le temps nécessaire pour atteindre un faible niveau d'humidité. Les simulations indiquent que le cas correspondant à une vitesse de **2 m/s** présente la cinétique de séchage la plus rapide, alors que la vitesse de **0,5 m/s** conduit au séchage le plus lent. Ces résultats sont en accord avec les tendances rapportées dans la littérature [2], où l'augmentation de la vitesse de l'air favorise le transfert de masse et améliore les performances du séchage convectif.

IV.6 Importance de la position des échantillons dans le séchoir

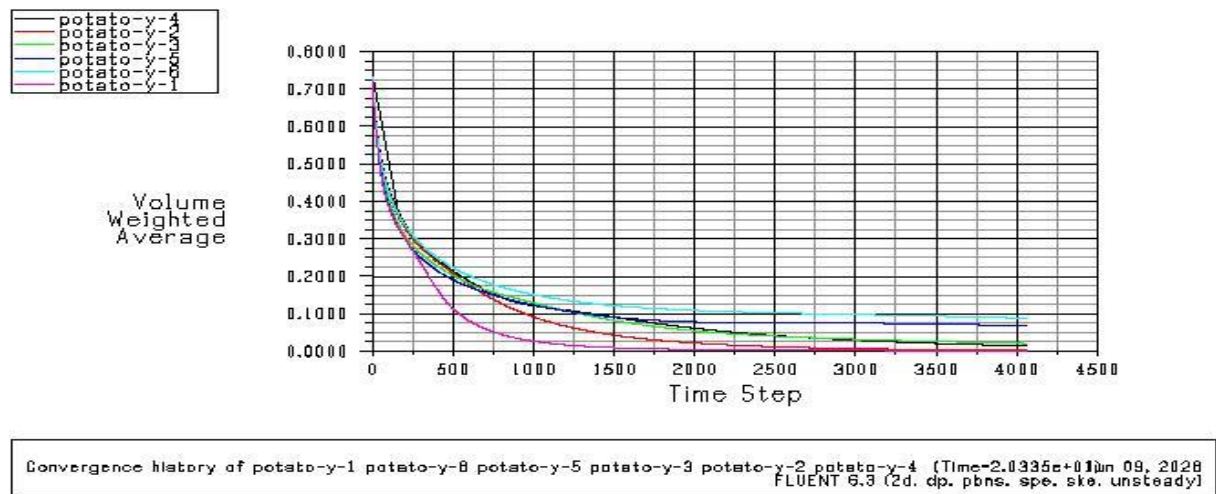


Figure IV 11: Évolution temporelle de la fraction massique d'eau dans l'échantillon de pomme de terre durant les 20 minutes de séchage (analyse de convergence)

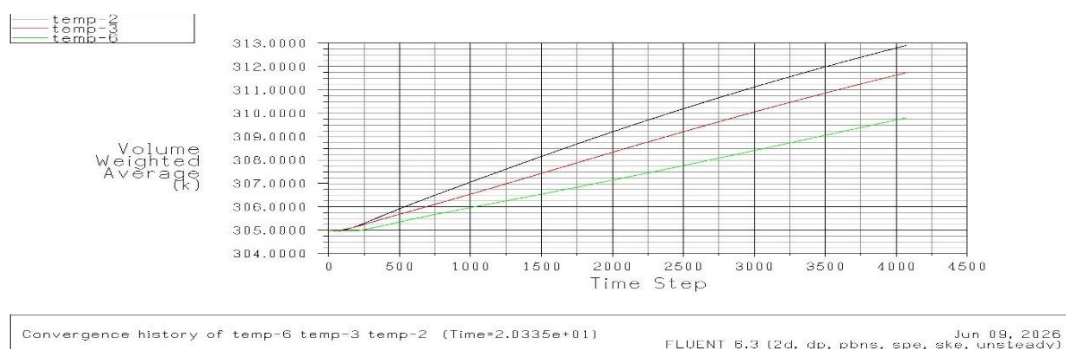


Figure IV 12: Evaluation de température à partir a la position

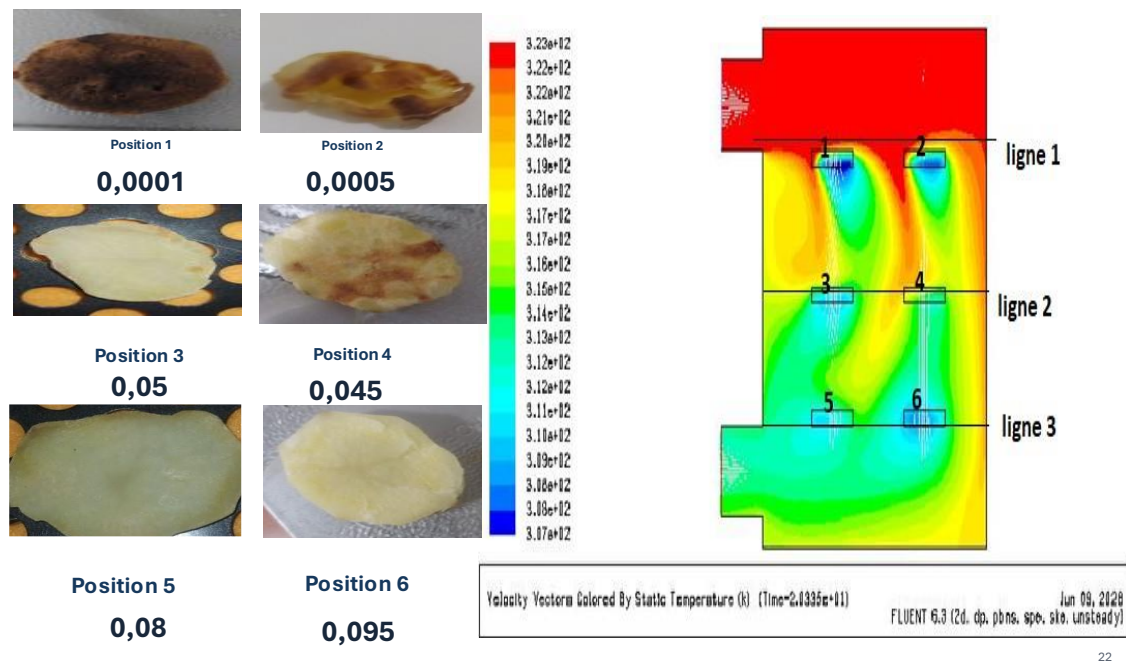


Figure IV 13: la position des échantillons dans le séchoir

À partir des graphes des **Fig IV 11 et 12**, il apparaît clairement que la position des échantillons à l'intérieur du séchoir influence fortement la distribution de la température et, par conséquent, la cinétique de séchage. L'analyse des profils thermiques selon l'axe x montre que la propagation de la chaleur n'est pas homogène dans toutes les zones du séchoir.

Pour la **ligne 1**, située directement dans l'axe de l'entrée d'air chaud, la température atteint les valeurs les plus élevées. Cette exposition directe au flux d'air favorise un transfert thermique important, ce qui accélère l'évaporation de l'eau. En conséquence, la teneur en eau résiduelle devient très faible, avec une fraction massique d'eau proche de zéro dans certaines zones. Toutefois, en s'éloignant de l'entrée d'air, notamment entre **20 cm et 27 cm**, une diminution progressive de la température est observée. Cette baisse est liée à l'éloignement de la source chaude, aux échanges thermiques avec les autres échantillons ainsi qu'aux pertes de chaleur dans le séchoir. La température locale peut alors descendre jusqu'à environ **305 K**, ce qui **Figure IV 13** explique la présence d'une humidité résiduelle pouvant atteindre **0,0005 kg d'eau/kg de matière sèche**.

Concernant la **ligne 2**, située au centre de la chambre de séchage, la distribution de température est relativement uniforme. Le flux d'air circule entre les échantillons et favorise un échange thermique efficace. Cet espace libre entre les produits constitue un avantage important, car il permet une meilleure pénétration de l'air chaud et améliore l'efficacité du séchage. ainsi qu'une fraction massique d'eau plus élevée, proche de **0,095 kg d'eau/kg de matière sèche**.

Cependant, certains échantillons présentent une position moins favorable. C'est le cas de l'**échantillon 6**, placé au-dessus de l'échantillon 4. Après avoir traversé l'échantillon 4, le flux d'air subit une déviation et une perte d'énergie, ce qui réduit son impact sur l'échantillon 6.

Cette situation se traduit par une température plus faible, d'environ **309 K**, ainsi qu'une fraction massique d'eau plus élevée, proche de **0,095 kg d'eau/kg de matière sèche**. Le retard de séchage observé constitue un inconvénient majeur et peut entraîner une non-uniformité de la qualité du produit final.

À l'inverse, l'**échantillon 5** bénéficie d'une position plus favorable permettant une meilleure exposition au flux d'air chaud. Les résultats montrent ainsi une température moyenne plus élevée et une élimination plus rapide de l'humidité ainsi qu'une fraction massique d'eau, proche de **0,08kg d'eau/kg de matière sèche**. La **Figure 10**, qui présente la température moyenne des différents échantillons, met clairement en évidence l'influence de leur position. Par exemple, l'écart de température entre les échantillons 2 et 6 atteint près de **5 K**, tandis qu'il n'est que d'environ **1 K** entre les échantillons 2 et 3.

IV.6.1 Conclusion

Les résultats obtenus montrent que la position des échantillons dans le séchoir joue un rôle déterminant sur l'uniformité du séchage. La localisation à l'entrée ou à la sortie du séchoir n'est pas nécessairement le facteur le plus critique. En revanche, la disposition relative des échantillons et les interactions avec le flux d'air sont essentielles. Une configuration en **zigzag** ou une répartition optimisée permettant une meilleure circulation de l'air chaud entre les produits pourrait améliorer significativement l'efficacité du séchage et garantir une meilleure homogénéité du produit final.

IV.7 Influence de la géométrie du séchoir sur les pertes énergétiques

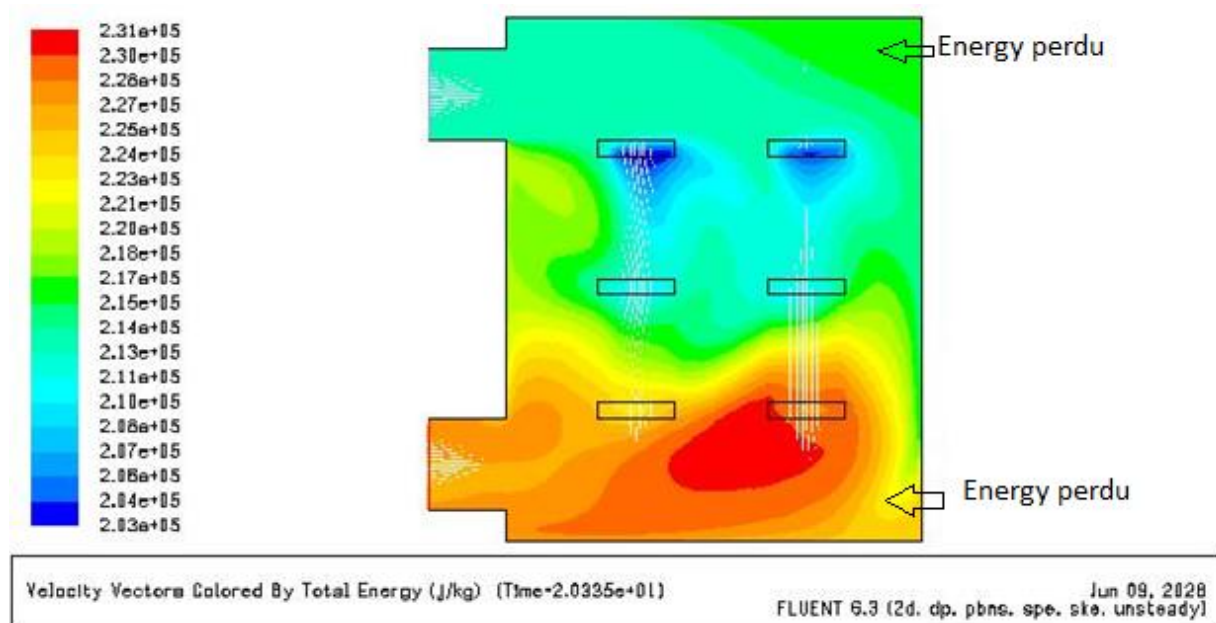


Figure IV 14: Distribution de l'Energy dans le séchoir

L'analyse de la **Figure IV 8** met en évidence l'influence importante de la géométrie du séchoir sur la répartition de l'énergie thermique. Les résultats montrent l'existence de zones caractérisées par des pertes énergétiques significatives, particulièrement dans les coins de la chambre de séchage. Des valeurs de l'ordre de **217 kJ/kg** sont observées dans la partie supérieure du séchoir autour de la position ($x = 27$ cm ; $y = 32$ cm), tandis que les pertes atteignent environ **224 kJ/kg** dans le coin inférieur situé à la position ($x = 27$ cm ; $y = 0$ cm).

Ces régions correspondent à des espaces vides qui ne participent pas directement au séchage des produits. Une partie importante de l'énergie thermique est ainsi dissipée dans ces zones sans contribuer à l'évaporation de l'eau contenue dans les échantillons. Cette perte énergétique réduit l'efficacité globale du séchoir et contribue à la non-uniformité du séchage observée entre les différents échantillons.

La présence de coins rectangulaires à angle droit (90°) favorise également la formation de zones de recirculation et de stagnation du flux d'air chaud. Par conséquent, une fraction de l'air chauffé n'est pas exploitée efficacement pour le transfert de chaleur et de masse. Cette énergie inutilisée pourrait être redirigée vers les échantillons présentant un retard de séchage, notamment l'échantillon 6.

IV.7.1 Conclusion 3

Les résultats obtenus montrent que la géométrie interne du séchoir constitue un paramètre essentiel pour les performances énergétiques du procédé. La réduction des espaces morts et l'amélioration du guidage de l'air chaud permettraient non seulement de diminuer les pertes énergétiques, mais également d'accroître l'efficacité du séchage et l'homogénéité de la qualité finale du produit.

IV.8 Effet de la teneur en humidité de l'air sur le processus de séchage

Tableau IV6: Conditions de simulation pour les deux cas étudiés

Paramètre	Cas 1 : Air humide (sans déshumidificateur)	Cas 2 : Air sec (avec déshumidificateur)
Température d'entrée	323 K	323 K
Vitesse d'entrée	2 m/s	2 m/s
Fraction massique H ₂ O (Y _{H₂O})	0.021	≈ 0.0001
Type d'air	Humide	Sec
Objectif	Cas de référence	Amélioration du séchage

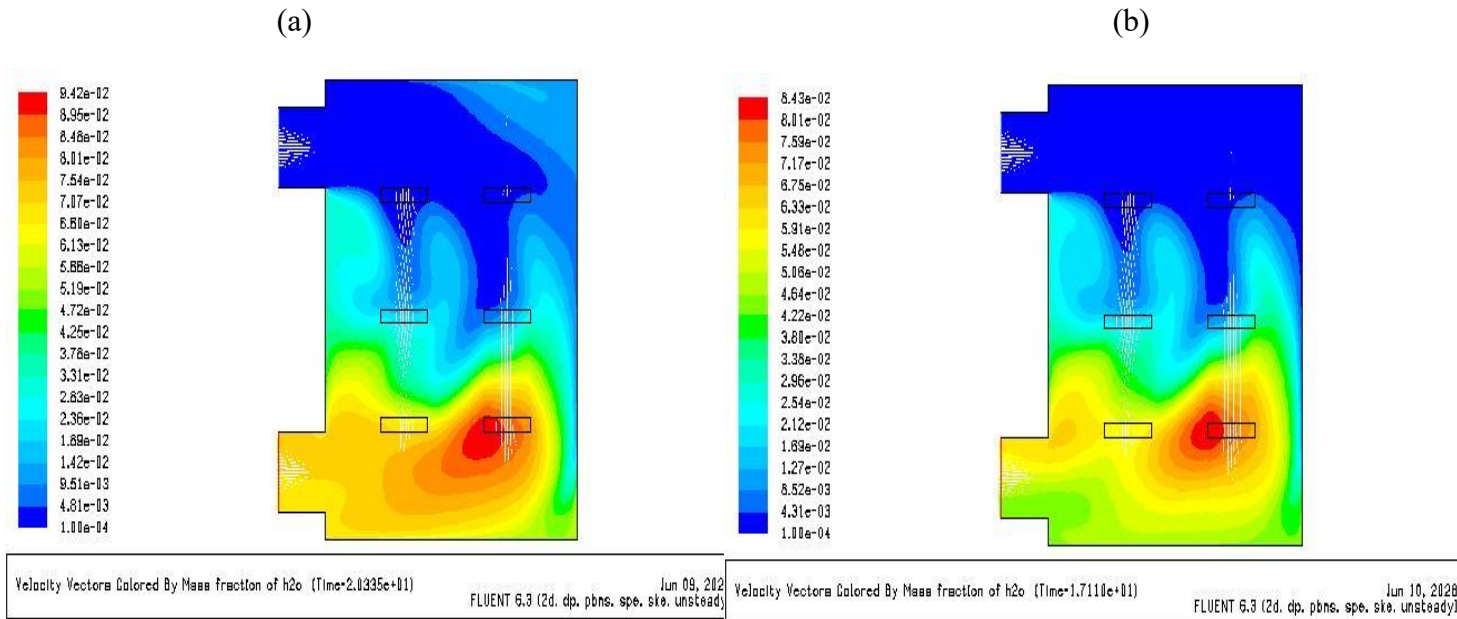


Figure IV 15: Comparaison de la fraction massique d'eau (H_2O) pour (a) 0.0001 et (b) 0.0212 kg/kg sec de séchage

L'effet de la teneur en humidité de l'air d'entrée sur le processus de séchage a été étudié à travers deux configurations principales. Dans le **cas 1**, l'air d'entrée présente une fraction massique d'eau de $Y_{H_2O} = 0.021$, correspondant à une condition d'air humide. Dans le **cas 2**, l'air est considéré comme parfaitement sec avec une fraction massique d'eau proche de $Y_{H_2O} \approx 0.0001$

Les conditions d'entrée sont maintenues constantes pour les deux cas, avec une température d'air fixée à **223.15 K** et une vitesse d'entrée de **2 m/s**.

Les résultats montrent que la réduction de l'humidité initiale de l'air améliore significativement le gradient de transfert de masse entre l'air et le produit. En effet, un air plus sec augmente la capacité d'absorption de l'humidité évaporée à partir de l'échantillon, ce qui accélère la cinétique de séchage.

IV.8.1 Conclusion 4

Ainsi, le cas avec air sec présente une diminution plus rapide de la teneur en eau du produit et une efficacité de séchage plus élevée par rapport au cas d'air humide. Cela confirme l'importance des conditions hygrométriques de l'air d'entrée dans la performance globale du séchage convectif.



Conclusion générale



Le séchage est une opération unitaire essentielle dans les industries agroalimentaires, permettant de réduire la teneur en eau des produits afin d'assurer leur conservation, de limiter le développement des micro-organismes et de préserver leur qualité. [1] Toutefois, ce procédé met en jeu des phénomènes complexes de transfert simultané de chaleur, de masse et de quantité de mouvement, dont la compréhension est indispensable pour améliorer les performances des systèmes de séchage.

Dans le premier chapitre, une étude bibliographique a permis de présenter les principes fondamentaux du séchage convectif, les mécanismes de transfert de chaleur et de masse, les propriétés de l'air humide, les différents modèles cinétiques de séchage ainsi que les principaux paramètres influençant les performances du procédé. Cette étude a également montré l'intérêt de la mécanique des fluides numérique (CFD) comme outil d'analyse et d'optimisation des séchoirs.

Le deuxième chapitre a été consacré à la présentation des équations gouvernantes décrivant les phénomènes physiques intervenant dans le séchage, notamment les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie, de la turbulence et du transport de l'humidité. Les différents modèles numériques utilisés dans cette étude ont également été présentés, en mettant en évidence leur rôle dans la simulation des transferts thermiques et hydriques au sein du séchoir.

Le troisième chapitre a décrit la méthodologie numérique adoptée sous **ANSYS Fluent 6.3.26**. Après la génération du maillage et la définition des conditions aux limites, la pomme de terre a été modélisée comme un milieu poreux homogène afin de représenter les échanges de chaleur et de masse entre le produit et l'air de séchage. Un matériau spécifique (*Potato*) a été créé en lui attribuant les propriétés thermophysiques appropriées. Les paramètres de porosité, de résistance visqueuse et de résistance inertielle ont été définis puis ajustés afin d'obtenir un comportement numérique cohérent avec les résultats de la littérature. Les équations gouvernantes ont été résolues par la méthode des volumes finis en utilisant le modèle de turbulence standard ($k-\epsilon$), l'équation de l'énergie et le modèle de transport des espèces.

Le quatrième chapitre a été consacré à la présentation et à l'analyse des résultats numériques. Les distributions des champs de vitesse, de température et d'humidité ont permis de mettre en évidence les principaux phénomènes de transfert au sein du séchoir. Les simulations ont montré que l'augmentation de la température de l'air améliore les transferts thermiques et accélère l'évaporation de l'humidité contenue dans la pomme de terre. De même, l'augmentation de la vitesse de l'air favorise les échanges convectifs, réduit la résistance au transfert de masse et diminue la durée de séchage. Les résultats ont également mis en évidence la présence de zones de recirculation influençant la répartition de la température et de la vitesse dans la chambre de séchage. La comparaison avec les résultats de référence publiés dans la littérature a montré un bon accord, ce qui confirme la fiabilité du modèle numérique développé.

Au terme de ce travail, il peut être conclu que la simulation CFD constitue un outil performant pour analyser les mécanismes de transfert de chaleur et de masse dans les procédés de séchage

convectif. L'approche adoptée a permis de mieux comprendre l'influence des paramètres opératoires sur les performances du séchoir et de fournir des informations utiles pour l'amélioration de sa conception et de son fonctionnement.[3]

Comme perspectives, il serait intéressant d'étendre cette étude à une modélisation tridimensionnelle, de considérer la variation des propriétés thermophysiques de la pomme de terre en fonction de sa teneur en eau, de prendre en compte le retrait du produit au cours du séchage et de réaliser une validation expérimentale plus approfondie. L'étude d'autres géométries de séchoirs, de nouveaux systèmes de distribution de l'air et de différentes stratégies d'optimisation énergétique pourrait également contribuer à améliorer les performances des procédés de séchage industriels.

Références bibliographiques chapitre VI et conclusion

- [1] S. Naderinezhad, N. Etesami, A. Poormalek Najafabady, M. Ghasemi Falavarjani, **Mathematical modeling of drying of potato slices in a forced convective dryer based on important parameters**, Food Sci. Nutr. 4 (1) (2016) 110–118
- [2] E. Akpinar, A.D.N.A.N. Midilli, Y. Bicer, **Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling**, Energy Convers. Manage 44 (10) (2003) 1689–1705.
- [3] Versteeg HK, Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2nd ed. Harlow: Pearson Education; 2007.