

CREATION D'UN AUTOMATE CELLULAIRE COMME OUTIL DE SIMULATION POUR LE SECHAGE DU MAÏS EN SILO

Par

Marie MARCAILLOU

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE AVEC MÉMOIRE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 13 JUIN 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Marie Marcaillou, 2025



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Philippe Bocher, directeur du mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme. Elmira Moosavi, présidente du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Stanislaw Kajl, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Turner, membre du jury
Exploitant agricole au Québec

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 27 MAI 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Le séchage du maïs est un enjeu clé dans l'agriculture moderne, où l'efficacité énergétique et la qualité du grain doivent être conciliées. Face aux défis posés par les méthodes conventionnelles de séchage, j'ai souhaité explorer une approche alternative, en m'appuyant sur les automates cellulaires pour modéliser ce processus de manière plus flexible et efficace.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une maîtrise avec mémoire en Génie mécanique, sous la supervision de Philippe Bocher. Il résulte de plusieurs mois d'analyses, de simulations et de validations numériques, avec pour objectif de proposer une méthode innovante pour l'optimisation du séchage du maïs.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche : Philippe Bocher, mes colocos, Maxime Audier, Maxime Benoist, Alban Delanchy, Maureen Kevorkian et Rémi Gegetieh, ainsi que mes proches pour leur soutien tout au long de ce projet.

Création d'un Automate Cellulaire comme Outil de Simulation pour le Séchage du Maïs en Silo

Marie MARCAILLOU

RESUME

Le séchage du maïs est une étape clé pour assurer sa conservation, mais il représente un enjeu énergétique et économique important. Ce travail propose une méthode de modélisation innovante basée sur un automate cellulaire, afin de simuler les transferts de chaleur et d'humidité à l'échelle du silo. L'approche, construite à partir des équations physiques du séchage (conduction, convection, diffusion), offre un compromis intéressant entre précision et efficacité de calcul. Des études paramétriques ont montré la capacité du modèle à représenter de manière réaliste l'influence de divers facteurs (humidité initiale, température, taille des grains). La validation, bien que réalisée avec des données issues du séchage de l'orge faute de données spécifiques au maïs, a confirmé la cohérence globale du modèle. Ce travail ouvre la voie à une meilleure maîtrise des procédés de séchage, et souligne l'intérêt de futures recherches pour affiner le modèle et explorer des phénomènes comme le tempérage.

Mots-clés : Séchage, maïs, automate cellulaire, modélisation, transfert thermique et massique

Development of a Cellular Automaton-Based Simulation Tool for Maize Drying in Silos

Marie MARCAILLOU

ABSTRACT

Maize drying is a critical step for ensuring grain preservation, yet it poses significant energy and economic challenges. This work introduces an innovative modeling approach based on cellular automata to simulate heat and moisture transfers at the silo scale. The model, built upon the fundamental physical equations of drying (conduction, convection, and diffusion), offers a valuable compromise between computational efficiency and physical accuracy. Parametric studies have demonstrated the model's ability to realistically capture the influence of key factors such as initial moisture content, temperature, and grain size. Validation was carried out using experimental data on barley drying, due to the lack of maize-specific data in the literature, and the simulated results showed good consistency with observed trends. This work lays the groundwork for improved control of drying processes and highlights the potential of further developments to refine the model and investigate phenomena such as tempering.

Keywords: Drying, maize, cellular automaton, modeling, heat transfer, mass transfer

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTERATURE	3
1.1 Différentes méthodes de séchage.....	3
1.1.1 Séchage en crib.....	3
1.1.2 Séchage à air ambiant.....	4
1.1.3 Séchage avec apport de chaleur	5
1.2 Consommation énergétique des séchoirs	6
1.3 Qualité du grain.....	8
1.4 Influence des conditions météorologiques	10
1.5 Impact de la quantité de poussière sur le séchage.....	11
1.6 Influence des variétés de maïs sur le séchage	11
1.7 Conclusion	12
CHAPITRE 2 ETAT DE L'ART : SIMULATIONS D'UN SYSTEME DE SECHAGE	15
2.1 Modèles analytiques et numériques	15
2.2 Automates cellulaires (AC).....	17
2.3 Conclusion	18
CHAPITRE 3 METHODOLOGIE	19
3.1 Thermodynamique de séchage.....	19
3.1.1 Modèle Conduction Thermique	21
3.2.1.1 Hypothèses.....	21
3.2.1.2 Équation.....	21
3.1.2 Modèle Convection Thermique.....	22
3.2.2.1 Hypothèses.....	22
3.2.2.2 Équation.....	23
3.1.3 Modèle de Bakker-Arkema	24
3.2.3.1 Hypothèses.....	25
3.2.3.2 Équations	25
3.2 Conclusion	31
CHAPITRE 4 MODELISATION PAR UN AUTOMATE CELLULAIRE	33
4.1 Construction des automates cellulaires	33
4.2 Implémentation du modèle de conduction	36
4.2.1 Résultats de la simulation de la conduction au sein d'un silo homogène ..	37
4.2.2 Résultats de la simulation de la conduction au sein d'un silo hétérogène .	39
4.3 Implémentation du modèle de convection	41

4.3.1	Résultats de la simulation de la convection au sein d'un silo homogène ..	42
4.3.2	Résultats de la simulation de la convection au sein d'un silo hétérogène .	44
4.4	Implémentation de la diffusion d'humidité.....	45
4.4.1	Équations des humidités.....	46
4.4.2	Codage.....	47
4.4.2.1	Discrétisation	47
4.4.2.2	Stabilité et précision numérique	47
4.4.3	Résultats de la simulation de la diffusion d'humidité au sein d'un silo homogène.....	48
4.4.4	Etude sur les différentes variables et paramètres	53
4.4.4.1	Considérations géométriques.....	53
4.4.4.2	Masse volumique de l'air	57
4.4.4.3	Chaleur latente.....	59
4.5	Conclusion	61
CHAPITRE 5 VALIDATION DU MODELE NUMERIQUE.....		63
5.1	Contexte et limites de la validation.....	63
5.1.1	Séchage sans arrêt	63
5.1.2	Séchage avec arrêt.....	67
5.2	Conclusion	70
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....		71
BIBLIOGRAPHIE.....		73

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Récapitulatif des méthodes	5
Tableau 1.2 Estimation du coût de séchage et des économies réalisées grâce à un séchoir à écoulement transversal continu avec récupération de chaleur.....	7
Tableau 1.3 Température maximale tolérée par les grains de maïs	8
Tableau 2.1 Récapitulatif de logiciels de simulation	16
Tableau 3.1 Paramètres thermiques	22
Tableau 3.2 Nombre de Nusselt en fonction du type de l'écoulement.....	23
Tableau 3.3 Différents modèles semi-empiriques développés pour le séchage de la couche mince des céréales	29
Tableau 3.4 Paramètres géométriques du grain (Pabis et al. 1998)	30
Tableau 4.1 Différentes mesures d'humidité utilisées	46
Tableau 4.2 Récapitulatif de la discrétisation des équations	47
Tableau 5.1 Données expérimentales du séchage de l'orge étudiées	64
Tableau 5.2 Données expérimentales du séchage de l'orge avec temps d'arrêt (rouge).....	67

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Exemple de séchage du maïs en crib	3
Figure 1.2 Schéma du fonctionnement d'un séchoir à air ambiant.....	5
Figure 1.3 Valeurs approximatives de la consommation de combustible et des émissions de CO ₂ du séchage d'une tonne de maïs dans un séchoir à écoulement transversal continu	7
Figure 1.4 Taux de grain fêlés et brisés selon le type de séchage.....	9
Figure 1.5 Évolution de la moisissure sur des grains de maïs à 18% (a), 21% (b) et 24% (c) de taux d'humidité.....	9
Figure 1.6 Données relatives au séchage de différentes céréales au cours des mois d'octobre et de décembre	10
Figure 2.1 Grille d'un AC modélisant une tranche d'un matériau hétérogène (chaque couleur est associée à un matériau)	18
Figure 3.1 Transferts thermiques et massiques durant le séchage du maïs	19
Figure 3.2 Courbe caractéristique de vitesse de séchage	20
Figure 4.1 Dimensions que peut prendre un automate cellulaire.....	34
Figure 4.2 Exemples de maillage possibles pour un AC	34
Figure 4.3 Voisinage de Von Neumann (A) et Von Neumann étendu (C), voisinage de Moore (B) et Moore étendu (D)	34
Figure 4.4 Représentation du silo comme un automate cellulaire	35

Figure 4.5	Représentation de la discrétisation de l'espace.....	36
Figure 4.6	Affichage de la grille représentant le silo lors de l'exécution de l'AC de la conduction pour 3 générations : A) 1 jour, B) 50 jours, C) 90 jours.....	38
Figure 4.7	Evolution de la température dans un silo homogène durant 150 jours.....	39
Figure 4.8	Exécution de l'AC de conduction pour un silo avec une couche supérieure chaude (23 °C) pour 3 générations : A) 1 jour, B) 50 jours, C) 90 jours.....	40
Figure 4.9	Evolution de la température au sein d'un silo hétérogène pendant 150 jours, lors de l'exécution de l'AC de conduction.....	41
Figure 4.10	Evolution de la température des grains dans un silo homogène lors de l'exécution de l'AC de convection au bout de A) 50 heures et B) 90 heures	43
Figure 4.11	Evolution de la température dans un silo homogène en prenant en compte les transferts thermiques de convection et conduction	43
Figure 4.12	Evolution du nombre de Biot pour l'exécution de l'AC de convection dans un silo homogène	44
Figure 4.13	Affichage de la grille représentant le silo avec une couche supérieure chaude (23°C) lors de l'exécution de l'AC de la convection pour 3 générations : A) 1 heure, B) 50 heures, C) 90 heures	45
Figure 4.14	Évolution de la température des grains pour un silo homogène lors de l'exécution de l'AC de diffusion d'humidité	49
Figure 4.15	Température de l'air pour différentes hauteurs à des moments donnés.....	50
Figure 4.16	Teneur en eau du grain en base humide pour pour deux températures des grains initiales différentes A) $T_o = 18\text{ °C}$, B) $T_o = 10\text{ °C}$	50

Figure 4.17	Vitesse de séchage (en s^{-1}) pour des températures de grain initialement différentes A) $T_o = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$, B) $T_o = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	51
Figure 4.18	Affichage de la température (A) et de la teneur en eau en base sèche (B) du grain lors de l'exécution de l'AC de diffusion d'humidité au bout de 20,83 heures de séchage	52
Figure 4.19	Analyse de l'impact de la forme géométrique du grain sur leur température.....	53
Figure 4.20	Evolution de la température de l'air ($^{\circ}\text{C}$) pour des formes de grain différentes A) modèle sphère, B) modèle parallélépipède	54
Figure 4.21	Evolution de la teneur en eau en base sèche pour des formes de grain différentes A) modèle sphère, B) modèle parallélépipède	54
Figure 4.22	Evolution de la vitesse de séchage (s^{-1}) pour des formes de grain différentes A) modèle sphère, B) modèle parallélépipède	55
Figure 4.23	Analyse de la diminution de 10% du rayon d'un grain sur sa teneur en eau en base sèche A) Base de comparaison B) Diminution 10%.....	56
Figure 4.24	Analyse de l'augmentation de 10% du rayon d'un grain sur sa teneur en eau en base sèche A) Base de comparaison B) Augmentation 10 %	56
Figure 4.25	Analyse de l'impact de la masse volumique de l'air en la considérant constante ou variable A) $\rho_{\text{air}} = 1,2\text{ kg.m}^{-3}$ B) $\rho_{\text{air}} = f(T_{\text{air}}, \text{HR})$	57
Figure 4.26	Analyse de l'impact de la masse volumique de l'air sur la température des grains A) $\rho_{\text{air}} = 1,2\text{ kg.m}^{-3}$ B) $\rho_{\text{air}} = f(T_{\text{air}}, \text{HR})$	58
Figure 4.27	Analyse de l'impact de la masse volumique de l'air sur la teneur en eau en base sèche des grains A) $\rho_{\text{air}} = 1,2\text{ kg.m}^{-3}$ B) $\rho_{\text{air}} = f(T_{\text{air}}, \text{HR})$	58

Figure 4.28	Analyse de l'impact de la chaleur latente de vaporisation de l'eau sur la température de l'air A) $h_v = 2\,454 \text{ kJ.kg}^{-1}$ B) $h_v = f(T_{\text{grain}})$ 59
Figure 4.29	Analyse de l'impact de la chaleur latente de vaporisation de l'eau sur la température des grains A) $h_v = 2\,454 \text{ kJ.kg}^{-1}$ B) $h_v = f(T_{\text{grain}})$ 60
Figure 4.30	Analyse de l'impact de la chaleur latente de vaporisation de l'eau sur la teneur en eau en base sèche des grains A) $h_v = 2\,454 \text{ kJ.kg}^{-1}$ B) $h_v = f(T_{\text{grain}})$ 60
Figure 5.1	Exécution de l'AC de diffusion d'humidité avec pour données d'entrée variables, les données de séchage de l'orge de Daniel Turner (2022) pour étudier un séchage sans arrêt. A) Température de l'air, B) Température des grains, C) Humidité des grains 66
Figure 5.2	Exécution de l'AC de diffusion d'humidité avec pour données d'entrée variables, les données de séchage de l'orge de Daniel Turner (2022) pour étudier un séchage avec un arrêt. A) Température de l'air, B) Température des grains, C) Humidité des grains 69

LISTE DES SYMBOLES ET UNITES DE MESURE

NOMBRES ET CONSTANTES USUELS

B_i	nombre de Biot
F_o	nombre de Fourier
N_u	nombre de Nusselt
R_e	nombre de Reynolds
P_e	constante de Prandtl

SYMBOLES ASSOCIES AU GRAIN

T	température du grain au sein du silo	$^{\circ}\text{C}$
a	rapport de l'aire de la surface du grain sur son volume	m^{-1}
C_p	chaleur spécifique du maïs à pression constante	$\text{J} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
D_m	coefficient de diffusion massique	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
k_{grain}	conductivité thermique du grain	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
h	coefficient de convection thermique	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
α	diffusivité thermique	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
ρ	masse volumique du maïs	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

SYMBOLES ASSOCIES A L'AIR

T_a	température de l'air ventilé dans le silo	$^{\circ}\text{C}$
V	vitesse de l'air ventilé	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
G_a	$\rho_{\text{air}} * V$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
C_{pa}	chaleur spécifique de l'air à pression constante	$\text{J} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
k_{air}	conductivité thermique de l'air	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
ρ_{air}	masse volumique de l'air	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

SYMBOLES ASSOCIES A L'EAU

C_{eau}	chaleur spécifique de l'eau à pression constante	$\text{J}.\text{°C}^{-1}$
C_{pv}	chaleur spécifique de la vapeur d'eau à pression constante	$\text{J}.\text{°C}^{-1}$
h_v	chaleur latente de vaporisation de l'eau	$\text{J}.\text{kg}^{-1}$
ρ_{eau}	masse volumique de l'eau	$\text{kg}.\text{m}^{-3}$

HUMIDITES

H	humidité absolue de l'air ventilé dans le silo	$\text{g}.\text{m}^{-3}$ ou $\text{kg}.\text{m}^{-3}$
HR	humidité relative	%
H_{db}	humidité en base sèche du grain	$\text{kg}(\text{H}_2\text{O}).\text{kg}^{-1}$ (ms)
H_{wb}	humidité en base humide du grain	%
M_e	humidité d'équilibre absolue du grain	
M_o	humidité absolue du grain à l'état initial	
M_l	humidité absolue du grain à l'état final	

CONSTANTES DE PROGRAMMATION

e	taille d'une cellule de grain de l'AC
Δt	pas de temps
G	nombre de génération
rows	nombre de lignes du tableau silo
cols	nombre de colonne du tableau silo

INTRODUCTION

Le maïs est la céréale la plus cultivée au monde. Malgré les 70 % de sa production mondiale dédiée à l'alimentation animale, elle constitue la principale source nutritive de nombreux pays d'Amérique et d'Afrique. Le maïs permettrait d'apporter entre 15 % et 20 % des calories journalières nécessaires pour les populations de plus de 20 pays (Couturier et al. 2022). Les changements climatiques et géopolitiques, tels qu'en Ukraine, qui commencent déjà à bouleverser l'ordre du monde, risquent d'avoir un impact fatidique pour ces personnes, en retirant leur première source nutritive. Il est nécessaire que la recherche progresse afin de suivre cette évolution certaine.

Le maïs est une des céréales des plus problématiques dans l'agroalimentaire car étant récoltée à des taux d'humidité souvent supérieur à 20 %, elle requiert d'être séchée avant de pouvoir être stockée, transportée, revendue à travers le monde entier. Ce processus, bien que nécessaire, représente une part significative de la consommation énergétique dans la filière céréalière.

Afin de pouvoir continuer d'assurer une production de maïs responsable et autonome des pays la recherche dans le domaine de production du maïs et particulièrement du séchage doit se poursuivre.

Objectif :

Cette étude a pour objectif principal de modéliser et de simuler le séchage du maïs en lit stationnaire en prenant en compte les transferts de chaleur et de masse qui s'y produisent. Plus précisément, elle vise à :

- Etudier le processus de séchage ainsi que les différentes méthodes employées.
- Analyser et quantifier les mécanismes de transfert thermique et massique impliqués dans le séchage du maïs, en intégrant successivement les effets de conduction,

convection et diffusion de l'humidité afin d'évaluer leur influence, tant individuellement que de manière couplée.

- Concevoir un modèle numérique fondé sur un automate cellulaire pour simuler l'évolution de la température et de l'humidité du grain au cours du temps.
- Vérifier la validité du modèle en le confrontant à des données expérimentales, afin d'évaluer sa fiabilité et sa capacité à reproduire les conditions réelles de séchage.
- Examiner les performances du modèle et proposer des améliorations en identifiant les principaux facteurs influençant l'efficacité du séchage.

Pour atteindre ces objectifs, une approche méthodologique progressive a été adoptée, permettant de valider chaque étape de la modélisation, et de complexifier petit à petit l'outil de simulation avant d'intégrer l'ensemble des phénomènes en jeu.

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Différentes méthodes de séchage

Dans une démarche plus écologique, plus économique, et d'amélioration de la qualité, on cherche à étudier les avantages et inconvénients des différentes méthodes de séchage. Dans la section suivante, nous passerons en revue quelques-unes d'elles et étudierons leurs impacts.

1.1.1 Séchage en crib



Figure 1.1 Exemple de séchage du maïs en crib

Le séchage en crib (cf. Figure 1.1) consiste à stocker les cosses de maïs récoltées en extérieur, dans de grandes cages en grillage positionnées perpendiculairement au sens du vent dominant. Cette méthode s'est déjà montrée efficace au Canada même. La ferme Michaudville au Québec l'utilise encore aujourd'hui.

Les cribs sont faciles à construire, et ne nécessitent aucune source d'énergie à leur fonctionnement, ce qui la rend très économique. Cette méthode résout le problème de

consommation d'énergie des productions, apporte une fluidité dans la logistique puisqu'elle contribue à réduire la zone de séchage à la même zone de stockage et à réduire le nombre de transports intermédiaires.

Une étude menée au Bangladesh en 1995 par B. K. Bala and M. A. Hossain, permet de mieux appréhender les problèmes qui découlent d'un grain humide qui sèche en crib : l'augmentation du taux d'infestation, la baisse du taux de germination et ainsi donc une perte de qualité du grain. Cependant cette méthode dépend énormément des conditions météorologiques, et comme le montre l'article bangladeshi de Bala et Hossein, tous les climats ne sont pas adaptés et le séchage est plus long. De ce fait, c'est avantageux lorsque la production de maïs n'est pas le seul apport financier de l'exploitation.

1.1.2 Séchage à air ambiant

Cette deuxième technique offre aussi l'avantage d'avoir l'espace de stockage et de séchage réuni en un silo. Le maïs est séché par un débit d'air provenant de l'extérieur, qu'un ventilateur fait circuler depuis le bas du silo vers le haut (voir Figure 1.2). En amont du ventilateur, on peut ajouter différentes pièces qui augmenterait la température de l'air ventilé grâce au rayon du soleil par exemple, mais ceci reste une option.

Cette technique réduit les coûts drastiquement, et les récoltes sont moins sujettes aux altérations dues aux conditions météorologiques qu'en crib, même si elles n'y échappent pas totalement. En effet, puisque l'air envoyé dans le silo provient de l'extérieur, un climat humide peut ralentir fortement le séchage. Cette méthode ne peut donc être mise en place dans des climats trop humides.

Elle reste la technique la plus intéressante pour une exploitation de taille moyenne. Elle offre l'avantage d'un grain de qualité à un coût de production faible. L'apport potentielle de chaleur lui confère une flexibilité quant aux conditions extérieures non négligeable. Dyck (2020) montre que le séchage à air ambiant du maïs permet d'économiser jusqu'à 40 % d'énergie par rapport aux séchoirs traditionnels tout en assurant un séchage homogène.

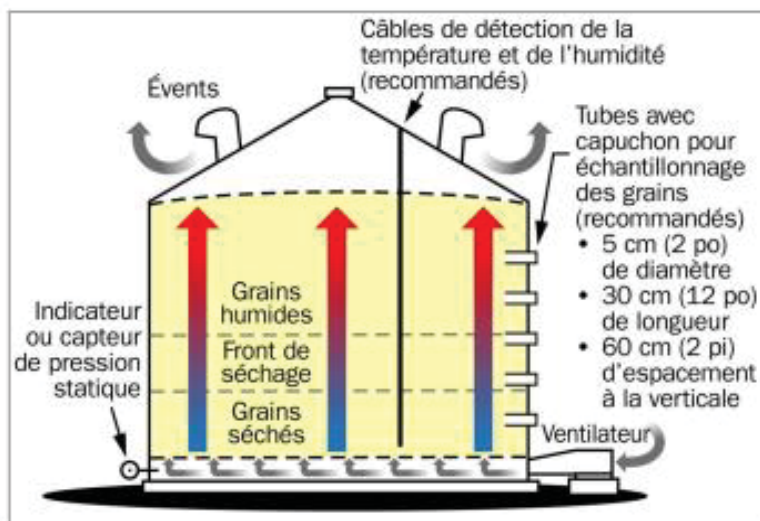


Figure 1.2 Schéma du fonctionnement d'un séchoir à air ambiant
Tirée de Dyck (2020)

1.1.3 Séchage avec apport de chaleur

Les séchoirs industriels à apport de chaleur utilisent une source d'énergie externe (propane, gaz naturel, biomasse, ...) pour chauffer l'air de séchage. Il en existe plusieurs types :

- Séchoirs à lit fluidisé : séchage rapide mais consommation énergétique élevée.
- Séchoirs à tour : adaptés aux grandes exploitations, offrant un bon rendement énergétique.
- Séchoirs en continu : largement utilisés en agriculture industrielle.

Leur avantage réside dans la rapidité du temps de séchage. Quelques heures suffisent pour sécher de grandes quantités de grain. En apportant de la chaleur via une source d'énergie (34 l de propane ainsi que 5 kW d'électricité pour une tonne de maïs, cf. Figure 1.3), ce séchage se libère des contraintes météorologiques. Cependant, dû aux frais d'installation, de consommation, et de manutention, le maïs voit son coût de production s'envoler et sa logistique se complexifier grandement. Elle reste, malgré tout, la méthode la plus usée en agriculture aujourd'hui.

Tableau 1.1 Récapitulatif des méthodes

Méthode	Consommation énergétique	Temps de séchage	Impact qualité	Coût	Adaptation climatique
Crib	Nulle	Long (semaines)	Risque de moisissures	Faible	Complètement dépendant
Air ambiant	Modérée	Moyen (jours)	Bonne	Moyen	Sensible
Apport de chaleur	Très élevée	Court (heures)	Risque de fissuration	Très élevé	Indépendant du climat

Le choix d’une méthode de séchage repose sur un équilibre entre coût, efficacité et préservation de la qualité du grain (cf. Tableau 1.1). Toutefois, pour optimiser ces processus et mieux comprendre leurs effets, la simulation numérique s’impose comme un outil puissant. Dans la section suivante, nous explorons plus en détails la consommation énergétique de ces infrastructures.

1.2 Consommation énergétique des séchoirs

Dans un contexte climatique particulièrement tendu, il est normal d’interroger chacune des dépenses énergétiques. Dans l’agroalimentaire, cette chaîne d’énergie part des champs jusque dans les assiettes. La production de céréales n’y échappe pas : ensemencement, irrigation, récolte, stockage, transports logistiques, etc. Mais de toutes ces étapes, c’est le séchage qui s’impose souvent comme le plus gourmand, avec une part de l’énergie totale consommée allant jusqu’à 30 % (Dyck, 2020).

Comme le montre la Figure 1.3, il faut dépenser environ 34 l de propane afin de réduire la teneur en eau de 25 % aux 15 % acceptables pour le stockage d’une tonne maïs.

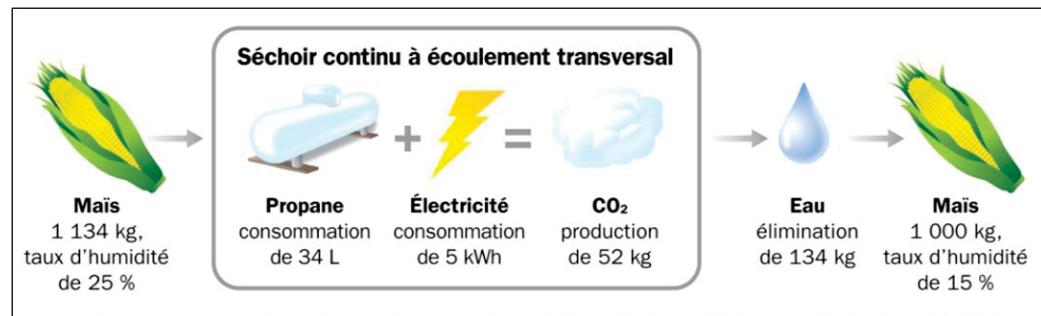


Figure 1.3 Valeurs approximatives de la consommation de combustible et des émissions de CO₂ du séchage d'une tonne de maïs dans un séchoir à écoulement transversal continu
Tirée de Dyck (2020)

Tableau 1.2 Estimation du coût de séchage et des économies réalisées grâce à un séchoir à écoulement transversal continu avec récupération de chaleur
Tiré de Dyck (2017)

Quantité de maïs séché (taux d'humidité de 25 % à 15 %)	Consommation de propane	Coût du propane (0,50 \$/L)	Économies en coûts de combustible (\$) selon le pourcentage de réduction		
			(économie de 20 %)	(économie de 30 %)	(économie de 40 %)
Tonnes métriques (boisseaux)	L	\$			
50 (1 968)	1 700	850 \$	170 \$	255 \$	340 \$
100 (3 936)	3 400	1 700 \$	340 \$	510 \$	680 \$
500 (9 842)	17 000	8 500 \$	1 700 \$	2 550 \$	3 400 \$
1 000 (39 368)	34 000	17 000 \$	3 400 \$	5 100 \$	6 800 \$

De nombreux progrès ont déjà abouti. Par exemple la mise en place de systèmes de récupération de chaleur. Comme le montre le Tableau 1.2, réduire de 40% sa consommation de propane permettrait de réaliser jusqu'à 680 000 \$ d'économies pour 100 000 tonnes de maïs à sécher. Sans atteindre la neutralité énergétique, cette innovation offre aux producteurs une nette diminution des coûts liés au séchage.

En dépit de cet avantage, la majorité des machines de séchage reste inchangée, vieux et dévoreurs d'énergie. Une étude de l'ADEME (agence de la transition écologique française) et

de l’entreprise SOLAGRO montre qu’en 2018, le parc matériel français pour le séchage est composé principalement de machines comme les séchoirs bi-étagés âgés de plus de 25 ans. Selon une estimation, ceci entraînerait une consommation française pour le séchage de 240 ktep (kilo tonne équivalent pétrole).

Si l’optimisation énergétique des séchoirs est un enjeu majeur, l’utilisation même des séchoirs est aussi à discuter. En effet, un séchage mal contrôlé peut altérer les propriétés physiques et microbiologiques du maïs, entraînant des fissurations, une perte de masse ou le développement de moisissures. La section suivante explore ces impacts sur la qualité du grain.

1.3 Qualité du grain

Le maïs est sensible aux variations de température et d’humidité. Un séchage trop rapide ou une exposition excessive à une chaleur élevée peut provoquer des chocs thermiques (cf. Tableau 1.3), entraînant des fissurations du grain. Ces fissures facilitent l’infiltration de micro-organismes et augmentent le taux de grains cassés lors des manipulations ultérieures. Un grain abîmé n’aura pas les mêmes propriétés nutritives, la même capacité de germination, etc.

Tableau 1.3 Température maximale tolérée par les grains de maïs
Adapté de Brook (1992), McMorris (2002), Maier, Watkins (1998)

Grain	End Use	Limit	
		°F	°C
Corn	Seed	100-110	38-43
	Dry Milling	100-110	38-43
	Wet Milling	130-140	54-60
	Feed Use	160-180	71-82
Popcorn	Snack Food	100	38

Une étude d’ARVALIS (cf. Figure 1.4) a montré que le taux de fissuration et de brisures varie en fonction des conditions de séchage. Par exemple, les séchoirs à haute température (supérieure à 50°C) génèrent un taux de grains brisés jusqu’à 30 % plus élevé que les méthodes à air ambiant.

Taux de grains fêlés et de grains brisés dus au séchage 1		
Méthode de séchage	Grains fêlés (%)	Grains brisés (%)
Témoin (séchage à l'air ambiant)	1,5	5,6
Séchage normal	43,6	11,3
Dryeration	7,6	6,7

(source ARVALIS - Institut du végétal)

Figure 1.4 Taux de grain fêlés et brisés selon le type de séchage
Tirée d'ARVALIS (2018)

A ces méthodes sont associés un nombre de manipulations du grain avant et après le séchage, ce qui influence également sa qualité. Une augmentation du nombre de manutentions peut induire une réduction de la germination pour les grains destinés aux semences ainsi qu'une baisse de la qualité nutritionnelle due à la dénaturation de certaines protéines.

De plus, une mauvaise homogénéisation du séchage peut créer des "poches d'humidité", où les moisissures se développent de façon localisée, rendant l'ensemble du stock vulnérable. Un taux d'humidité trop élevé dans les grains favorise l'apparition de moisissures. Les champignons du genre *Aspergillus*, *Fusarium* et *Penicillium* sont particulièrement problématiques, car ils produisent des mycotoxines, substances toxiques dangereuses pour la santé humaine et animale.

Une expérience menée par Yewle en 2023 a mis en évidence qu'un taux d'humidité de 21 % à 24 % entraîne une prolifération rapide des moisissures en moins de 21 jours (voir Figure 1.5). En dessous de 15 %, la croissance des champignons est fortement ralentie, voire stoppée.

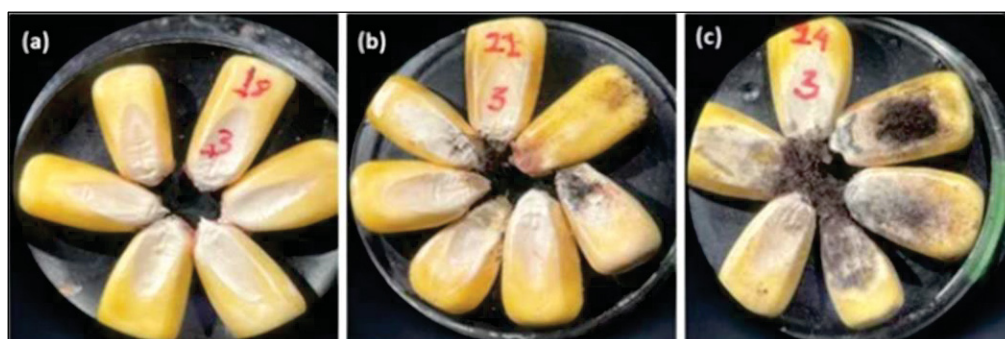


Figure 1.5 Évolution de la moisissure sur des grains de maïs à 18% (a), 21% (b) et 24% (c) de taux d'humidité

Tirée de Yewle (2023)

1.4 Influence des conditions météorologiques

Les conditions climatiques jouent un rôle déterminant dans le séchage du maïs, notamment pour les méthodes de séchage en crib et séchage à air ambiant.

Température et humidité relative de l'air : Un air chaud et sec favorise un séchage rapide, tandis qu'un air froid et humide ralentit l'évaporation de l'eau contenue dans le grain. La vitesse du séchage suit généralement la loi de Clausius-Clapeyron, qui décrit la dépendance de la pression de vapeur à la température. Exemple : Un séchage naturel dans une région sèche sera beaucoup plus efficace qu'en climat tempéré humide.

La fiche technique sur le séchage à l'air libre de Dyck (cf. Figure 1.6) présente des données intéressantes sur la durée du séchage au cours des différents mois de l'année, en prenant en considération la température extérieure, l'humidité relative de l'air, etc.

Octobre		Décembre	
Conditions météo sans apport additionnel de chaleur : 9 °C, 63 % d'humidité relative		Conditions météo sans apport additionnel de chaleur : -3 °C, 77 % d'humidité relative	
Le maïs sèche en	20 jours pour atteindre 14,5 % d'humidité.	Le maïs sèche en	88 jours pour atteindre 19,0 % d'humidité.
Le soya sèche en	18 jours pour atteindre 11,6 % d'humidité.	Le soya sèche en	108 jours pour atteindre 16,1 % d'humidité.
Le blé tendre sèche en	16 jours pour atteindre 13,4 % d'humidité.	Le blé tendre sèche en	50 jours pour atteindre 16,2 % d'humidité.
Le blé dur sèche en	19 jours pour atteindre 14,7 % d'humidité.	Le blé dur sèche en	92 jours pour atteindre 18,2 % d'humidité.

Figure 1.6 Données relatives au séchage de différentes céréales au cours des mois d'octobre et de décembre
Tirée de Dyck (2020)

Vitesse et direction du vent : Un vent fort accélère l'échange d'humidité entre l'air et le grain, mais peut aussi causer une hétérogénéité du séchage en créant des zones mal ventilées. Dans un séchage naturel, le placement des cribs par rapport aux vents dominants est un paramètre clé pour garantir un séchage homogène.

Rayonnement solaire : Dans le cas du séchage en champ ou en crib, l'ensoleillement direct favorise la montée en température du grain. Cependant, une exposition prolongée peut provoquer une surchauffe, entraînant une fissuration du grain et une dégradation de la qualité.

1.5 Impact de la quantité de poussière sur le séchage

La présence de poussières et d'impuretés dans le maïs influence non seulement le séchage, mais aussi la consommation énergétique des séchoirs industriels.

Réduction de l'efficacité du transfert de chaleur et de masse : Une couche de poussière sur les grains agit comme un isolant thermique, réduisant la conduction de la chaleur vers le cœur du grain. Elle peut aussi obstruer les pores du grain, limitant la diffusion de l'humidité vers l'extérieur.

Problèmes liés aux séchoirs industriels : Les poussières en suspension peuvent s'accumuler dans les séchoirs, réduisant l'efficacité des flux d'air et augmentant les risques de surchauffe locale. Un excès de poussières peut également poser un risque d'inflammation dans certains types de séchoirs (ex. séchage à air chaud).

Solutions d'atténuation : Un nettoyage préalable des grains (tamisage, aspiration) permet de réduire ces effets négatifs et d'améliorer l'efficacité du séchage. L'utilisation de pré-filtres dans les systèmes de ventilation aide à limiter l'accumulation de poussières dans les séchoirs mécaniques.

1.6 Influence des variétés de maïs sur le séchage

Toutes les variétés de maïs ne réagissent pas de la même manière au séchage. Les différences structurelles et chimiques influencent :

- La vitesse d'évacuation de l'eau.
- Le risque de fissuration.
- L'efficacité énergétique du séchage.

Taille et forme du grain : Les variétés à grains durs (ex. maïs flint) présentent une diffusion plus lente de l'humidité et nécessitent des temps de séchage plus longs. À l'inverse, les variétés à grains farineux (ex. maïs denté) sèchent plus rapidement mais sont plus sensibles à la fissuration thermique.

Teneur initiale en humidité : Certaines variétés possèdent une capacité de rétention d'eau plus élevée, nécessitant des conditions de séchage plus intensives. Un grain récolté trop tôt (humidité > 25 %) est plus difficile à sécher et présente un risque accru de moisissures.

Résistance mécanique du grain : Certaines variétés sont plus résistantes aux chocs thermiques, limitant le risque de fissuration pendant le séchage rapide. Exemple : Des études ont montré que le maïs hybride X résiste mieux à la fissuration que le maïs traditionnel Y lors d'un séchage à haute température.

Optimisation du séchage en fonction de la variété : Le choix d'une variété adaptée aux conditions locales peut réduire les coûts énergétiques du séchage. Certains travaux récents explorent l'amélioration génétique pour développer des variétés à séchage plus rapide et à meilleure résistance thermique.

1.7 Conclusion

Le séchage du maïs est un processus complexe qui dépend non seulement des techniques utilisées, mais aussi de nombreux facteurs externes tels que les conditions météorologiques, la présence de poussières et les caractéristiques variétales du grain. Ces éléments influencent directement l'efficacité du séchage, la consommation énergétique et la qualité finale du produit.

Afin d'optimiser ce processus et d'améliorer les performances des méthodes existantes, une approche de modélisation et de simulation est nécessaire. Cette approche permet d'analyser finement les transferts de chaleur et d'humidité au sein du grain et de mieux comprendre l'impact des différents paramètres.

Le chapitre suivant présente un état de l'art des méthodes de simulation du séchage, en comparant les modèles analytiques, numériques et basés sur des automates cellulaires. Il servira de base à la construction du modèle développé dans cette étude.

CHAPITRE 2 ETAT DE L'ART : SIMULATIONS D'UN SYSTEME DE SECHAGE

Le séchage du maïs est un processus complexe impliquant des transferts simultanés de chaleur et de masse au sein d'un milieu poreux hétérogène. Etudier le phénomène n'est pas chose facile. En effet, les récoltes sont réalisées une fois par an et les jeux de paramètres à explorer infinis et difficiles à contrôler (conditions météorologiques, taux de poussière dans un stock de grains, variété de la céréale, etc.). Pour optimiser ce processus, il est essentiel de recourir à la modélisation et à la simulation numérique afin de réduire le coût et le temps d'expérimentation très élevé.

Plusieurs méthodes existent pour modéliser le séchage du maïs :

- Modèles analytiques : basés sur des équations empiriques.
- Modèles numériques : utilisation des différences finies, éléments finis ou méthodes de volumes finis.
- Approches alternatives : comme les automates cellulaires, qui permettent de simuler des phénomènes complexes avec une approche discrète.

Cette section passe en revue les principales méthodes et logiciels utilisés pour simuler le séchage du maïs, avant d'examiner l'intérêt des automates cellulaires dans ce domaine.

2.1 Modèles analytiques et numériques

Les modèles analytiques sont souvent utilisés pour prédire la courbe de séchage, mais leur approche reste globale, ils décrivent le séchage d'un grain par exemple. Les modèles numériques, en revanche, permettent une description plus fine des transferts de chaleur et de masse, ils sont capables de décrire les gradients au sein même d'un grain. Les plus utilisées sont :

- Les différences finies : approximations locales des dérivées partielles.

- Les éléments finis (FEM) : décomposition de l'espace en éléments pour une meilleure résolution spatiale.
- Les volumes finis (FVM) : approche utilisée en dynamique des fluides.

Il existe aujourd'hui très peu de documentation sur la modélisation numérique du séchage de grain de maïs, on trouve toutefois quelques articles sur le séchage d'autres aliments.

De nombreuses études sont réalisées sur les écoulements et échanges de chaleur au sein des machines de séchage, comme dans l'étude de Boumaiza de 2013. Pour de telles simulations, sont souvent utilisés les logiciels COMSOL Multiphysics, ANSYS fluent ou MATLAB. Ces logiciels permettent de modéliser plusieurs phénomènes physiques à la fois, notamment pour notre problème : l'écoulement d'un fluide en même temps qu'un transfert thermique.

Plusieurs logiciels sont disponibles pour la simulation du séchage des grains (cf. Tableau 2.1):

Tableau 2.1 Récapitulatif de logiciels de simulation

Logiciel	Approche	Avantages	Inconvénients
COMSOL Multiphysics	Éléments finis (FEM)	Modélisation multi-physique précise	Coût élevé, exigeant en calcul
ANSYS Fluent	Volumes finis (FVM)	Bonne gestion des écoulements d'air	Complexe à paramétrer
MATLAB	Différences finies (FDM)	Facile d'utilisation, flexible	Moins adapté aux simulations 3D
Drying Model Software	Empirique	Rapide et simple	Peu précis pour des grains hétérogènes

Ces logiciels nécessitent souvent en plus d'une puissance élevée de calcul, une calibration expérimentale. De plus, ils ne permettent pas toujours une simulation à grande échelle comme

pour un silo entier. Ils restent aussi difficiles à adapter à des scénarios variés et dynamiques (ex. modification des paramètres de séchage en temps réel).

2.2 Automates cellulaires (AC)

Les automates cellulaires appartiennent à une vaste classe d'algorithmes. Ils ont vu le jour dans les années 40 et ne cessent d'être développés. Ils ont été rendus célèbres par le Jeu de la Vie de Conway en 1971, qui doit son nom à la modélisation d'une population de cellules dont l'état peut varier de « vivante » à « morte ». Cet automate cellulaire (AC) s'est montré capable de nombreuses choses comme prédire la propagation d'un incendie forestier selon la répartition géographique des arbres (Abibi, 2013).

Les AC consistent en des programmes plus ou moins compliqués permettant d'observer l'évolution et la propagation de certaines propriétés dans un espace. Cet espace est modélisé par une grille représentant des zones spatiales par des cellules. L'intérêt des AC réside dans la modélisation simple des interactions entre les différentes cellules lorsqu'elles sont voisines. Chacune de ces cellules évolue de façon discrète en fonction de l'état de ses cellules voisines, c'est-à-dire par itération, appelée génération dans ce contexte.

Un automate cellulaire ayant une modélisation précise et juste d'un processus permet de simuler à faible coût, un grand nombre d'expériences avec des paramètres d'entrée variés. Il semblerait pourtant que peu de d'applications n'aient été réalisées en agriculture. On trouve quelques articles sur la répartition des pesticides, la propagation de maladie ou d'infestation dans les cultures. Dans son étude de 2018, Traore réussit par exemple à décrire la dynamique des criquets pèlerins, insectes ravageurs dans les cultures. Cependant l'automate cellulaire reste un outil sous-exploité dans ce domaine puisque rien n'est encore exploré sur le séchage.

Cette lacune m'a donc semblée intéressante et nécessaire à explorer. L'idée d'utiliser un automate cellulaire afin de modéliser le séchage du grain provient de la lecture d'un article publié sur la modélisation des échanges thermiques qui ont lieu au sein de matériaux hétérogènes (Violet et al, 2022). On peut voir une image de ce qu'ils ont créé sur la Figure 2.1.

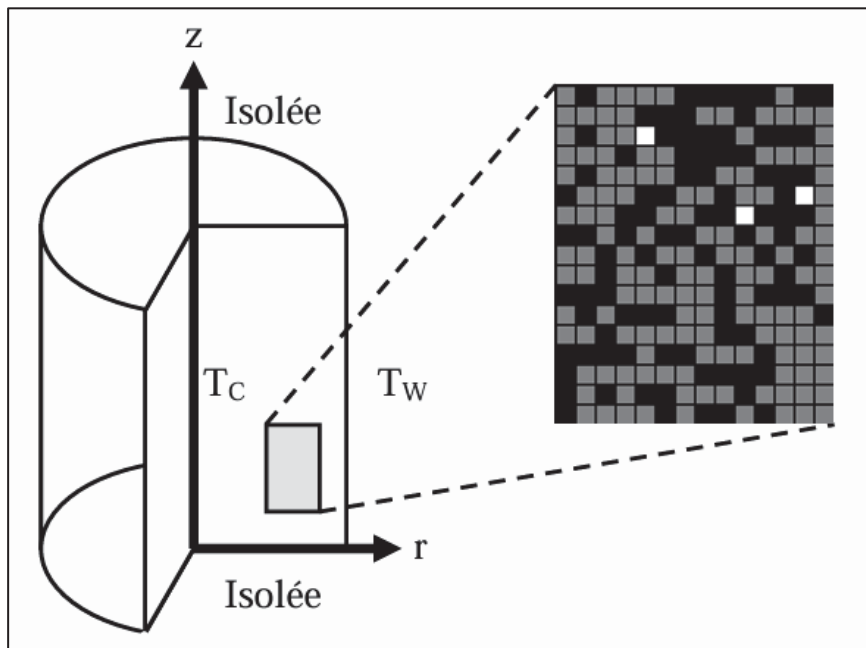


Figure 2.1 Grille d'un AC modélisant une tranche d'un matériau hétérogène (chaque couleur est associée à un matériau)
Tiré de Violet et al. (2022)

Pourquoi utiliser un automate cellulaire pour le séchage du maïs ?

- Il permet de modéliser l'hétérogénéité du séchage dans un silo.
- Il est moins coûteux en calcul que les méthodes FEM ou CFD.
- Il s'adapte facilement à différents scénarios (variation de température, ventilation, taux d'humidité).

2.3 Conclusion

Les modèles analytiques et numériques présentent certaines limites en termes de flexibilité et de coût de calcul. Afin de surmonter ces contraintes, nous avons opté pour une approche basée sur les automates cellulaires, permettant une modélisation plus détaillée et adaptable du séchage du maïs. La méthodologie adoptée pour développer ce modèle est détaillée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3 METHODOLOGIE

3.1 Thermodynamique de séchage

Nous allons maintenant détailler les fondements thermodynamiques du séchage, qui serviront de référence pour la simulation.

Le séchage du maïs repose sur des transferts thermiques et massiques complexes, influencés par la température de l'air, son humidité relative et la nature poreuse des grains. Comprendre ces mécanismes est essentiel pour optimiser le processus et minimiser la consommation énergétique. Cette section présente les bases thermodynamiques du séchage, en détaillant les phénomènes de conduction, de convection et de diffusion massique intervenant dans le système.

Dans notre étude, nous cherchons à modéliser le séchage par entraînement. Ce séchage consiste à placer un produit humide dans un flux d'air, plus ou moins chaud et sec. Ceci crée automatiquement un écart de température et de pression partielle de l'eau telle qu'un transfert de chaleur de l'air vers le produit et un transfert de matière du produit vers l'air prennent place (Figure 3.1). Ce type de séchage est le plus répandu en agroalimentaire.

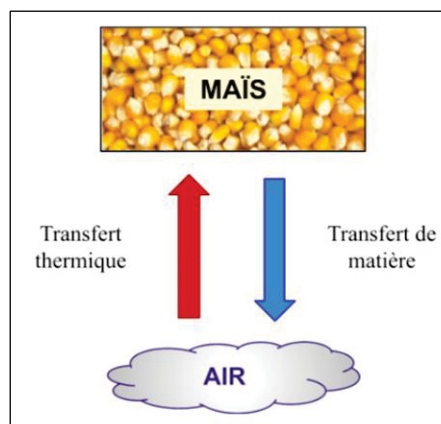


Figure 3.1 Transferts thermiques et massiques durant le séchage du maïs

Avant de regarder ces différents transferts en détails, voici une vue globale de ce qui se passe lors du séchage. Dans un grain de maïs, les molécules d'eau sont réparties dans toute la graine. Celles qui sont le plus au centre du grain (liées) se déplacent beaucoup plus difficilement vers l'extérieur que celles qui sont proches de la surface (libres). Trois phases durant le séchage d'un produit sont distinguées (Figure 3.2) :

1^{ère} phase : Le taux de séchage (vitesse de séchage) est à son maximum et reste constant. L'eau libre à la surface du grain s'évapore rapidement tant que la surface reste saturée en eau.

2^{ème} phase : Le taux de séchage commence à décroître car l'évaporation de l'eau devient limitée par la diffusion de l'eau de l'intérieur du grain à sa surface. Le liquide se déplace par capillarité à l'extérieur du grain. Elle joue un rôle important dans le transfert interne de l'humidité au sein du grain de maïs lors du séchage. En effet, la structure poreuse du grain agit comme un réseau de capillaires microscopiques, permettant à l'eau de migrer des couches internes vers la surface. Cette période dure jusqu'à ce que l'eau restante soit celle fortement liée au sein du grain.

3^{ème} phase : Le taux de séchage a tellement diminué qu'il est proche de 0. L'eau très liée, demande énormément d'énergie pour être évaporée. Durant cette phase on diminue très lentement la teneur en eau, selon l'état final du produit désiré, cela peut donc durer très longtemps.

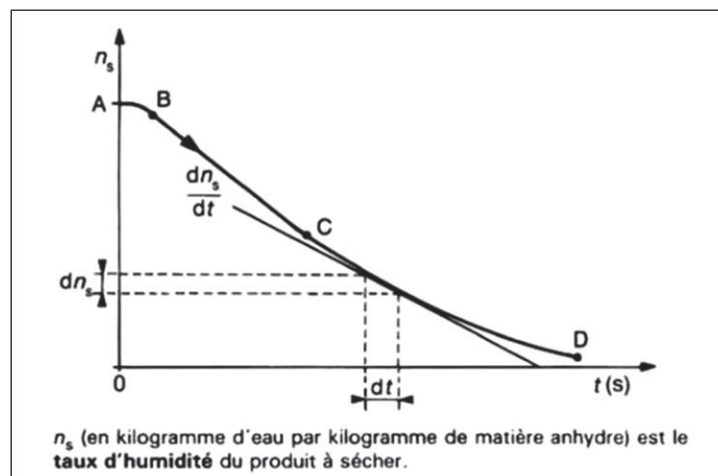


Figure 3.2 Courbe caractéristique de vitesse de séchage
Tirée de Charreau et al. (1997)

Après avoir décrit les différentes phases du séchage, il est essentiel de quantifier les mécanismes sous-jacents à ces transformations. Nous allons examiner successivement les modèles thermodynamiques permettant de prédire ces transferts de chaleur et de masse.

3.1.1 Modèle Conduction Thermique

Considérer uniquement les transferts thermiques de conduction n'est pas scientifiquement correcte pour le séchage, mais l'intérêt d'une telle considération est de pouvoir entraîner notre AC sur un phénomène simple et de corriger les erreurs premières avant de le complexifier par la suite.

3.1.1.1 Hypothèses

Ici on considère que tout est immobile au sein de silo, le ventilateur est éteint, l'air et les grains sont donc statiques. Les parois du silo sont supposées adiabatiques, ainsi il n'y aura pas de transfert thermique via les côtés du silo.

Lors de cette étude, la teneur en eau des grains reste constante, le but étant d'observer uniquement l'impact des transferts thermiques conductifs sur la variation de température des céréales.

3.1.1.2 Équation

L'équation de la chaleur suit une forme simplifiée de la loi de Fourier :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.1)$$

Afin de construire les interactions de l'AC, nous utiliserons les équations rassemblées dans le Tableau 3.1, issues du travail de Ince, pour calculer les différents paramètres thermiques du modèle. La conductivité thermique caractérise la capacité des matériaux à transmettre la chaleur (Marié, 2010). Plus elle est élevée, plus le matériaux est conducteur de chaleur. La diffusivité thermique caractérise quant à elle, l'inertie des matériaux, c'est-à-dire leur capacité

à stocker et à redistribuer la chaleur. Plus elle est grande, plus faible est son inertie (Marié, 2010).

Tableau 3.1 Paramètres thermiques
Tiré de Ince (2008)

Paramètres	Équations pour $T \in [10 ; 80] ^\circ\text{C}$ et $M \in [6 ; 27.5] \%$	R^2
Capacité calorifique $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$	$c_p = 1,1444 + 0,0320 M + 0,0051 T$	0,98
Conductivité thermique $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$	$k_{\text{grain}} = 0,0797 + 0,0048 M + 0,0006 T$	0,99
Diffusivité thermique $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	$\alpha = 9,893.10^{-8} + 1,15.10^{-9}M + 7,196.10^{-11}T$ Avec $\alpha = \frac{k_{\text{grain}}}{\rho c_p}$	0,98

3.1.2 Modèle Convection Thermique

3.1.2.1 Hypothèses

Contrairement à la conduction, la convection thermique repose sur le déplacement d'un fluide (ici, l'air ventilé) qui transfère la chaleur aux grains. Ce phénomène est crucial dans les séchoirs à air chaud, où la température et la vitesse du flux d'air influencent fortement le taux de séchage.

Ici on considère toujours être dans le cadre d'un problème unidimensionnel selon l'axe vertical (bas vers le haut du silo). L'humidité du grain sera considérée comme constante, le but est d'observer l'impact de la conduction et de la convection sur la température du grain au cours du temps.

3.1.2.2 Équation

Pour résoudre ce problème on utilise de nouveau l'équation de Fourier pour la conduction mais on intègre cette fois-ci la convection, que l'on peut exprimer via la loi de Newton :

$$q_{conv} = h(T_{grain} - T_{air}) \quad (3.2)$$

Avec :

T : la température du grain (K)

T_{air} : la température de l'air ventilé

q_{conv} : le flux thermique par unité de surface (W/m²)

h : le coefficient de convection thermique (W/m²·K)

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_{grain} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + h(T_{air} - T) \quad (3.3)$$

où :

ρ : la masse volumique du grain (kg/m³)

c_p : la capacité calorifique du grain (J.°C⁻¹)

k_{grain} : la conductivité thermique du grain (W.m⁻¹.°C⁻¹)

Le coefficient de convection thermique sera calculé selon l'Eq. 3.4, et Nu le nombre de Nusselt dont le calcul dépendant de Re (nombre de Reynolds) et Pr (nombre de Prandtl) change en fonction du régime de l'écoulement (cf. Tableau 3.2).

$$h = \frac{Nu \cdot k_{air}}{e} \quad (3.4)$$

avec :

k_{air} : la conductivité thermique de l'air (W.m⁻¹.°C⁻¹)

e : la taille d'une cellule de grain (m)

Tableau 3.2 Nombre de Nusselt en fonction du type de l'écoulement

Nombre de Nusselt	Type d'écoulement	Nombre de Reynolds
$Nu = 0,332 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$	Écoulement laminaire	$Re < 2000$
$Nu = 0,0296 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3}$	Écoulement turbulent	$Re > 4000$
$Nu = 0,0296 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{1/3}$	Écoulement instable	$2000 < Re < 4000$

Lorsque l'on est en présence de conduction et de convection, il est intéressant de regarder le poids de l'une par rapport à l'autre, d'où la création du nombre de Biot. Ce coefficient permet de savoir si le séchage est limité par la diffusion interne ou par l'échange de chaleur avec l'air extérieur.

- Si $Bi < 0.1$, alors le système sera considéré « mince ». La conduction y est négligeable et l'on peut considérer la température du système uniforme.
- Si $Bi > 0.1$, alors le système sera considéré « épais ». La conduction n'est plus négligeable, et il faudra prendre en compte les variations de température au sein même de l'objet d'étude.

Ce critère pourra être utilisé dans l'analyse des résultats du Chapitre 4.

3.1.3 Modèle de Bakker-Arkema

Le modèle de Bakker-Arkema est une approche semi-empirique qui couple les équations de conservation de l'énergie et de la masse. Il permet de prédire l'évolution conjointe de la température de l'air, de l'humidité relative et de la teneur en eau du grain.

Afin de modéliser la couche épaisse de grain dans le silo (plusieurs mètres), on la découpe en plusieurs couches minces. Une couche est supposée mince dès lors que les gradients de température et d'humidité internes peuvent être négligés dans la direction perpendiculaire au flux d'air. Dans notre cas la couche mince peut être assimilée à une rangée de cellule de l'AC.

Si les critères de définitions de la couche mince ne sont pas respectés, cela entraînera une instabilité du calcul (divergence) et de fortes erreurs dans les résultats.

Découper le problème tel quel permet de le résoudre par étape. On résout le système d'équations pour une couche donnée et les résultats deviennent les conditions d'entrée de la couche suivante, ainsi de suite.

3.1.3.1 Hypothèses

- Le retrait volumique d'un lit de grains est négligeable pendant le processus de séchage.
- Le gradient de température au sein de chaque grain est négligé.
- Les transferts de masse et de chaleur par conduction sont négligeables.
- Le flux d'air et le flux de grains sont de type « plug », ce qui signifie que chaque particule d'air dans la section du flux a la même vitesse. Ce modèle est souvent utilisé pour simplifier l'analyse des écoulements dans des systèmes où la turbulence est négligeable, comme dans un tube ou un conduit où l'écoulement est laminaire et très stable.
- Les variations temporelles d'humidité relative de l'air et de la température des grains est négligeable devant les variations spatiales selon la direction du courant d'air.
- Les parois du silo sont adiabatiques, ainsi leur capacité calorifique est négligeable.
- Les capacités thermiques de l'air humide et des céréales sont constantes pendant de courtes périodes.
- L'équation précise de la couche mince et l'isotherme d'équilibre de la teneur en humidité sont connues.

3.1.3.2 Équations

Lorsque l'on souhaite modéliser le processus de séchage pour un « deep bed », il faut être en mesure de prévoir l'évolution des variables suivantes :

1. $M(x,t)$: la teneur en eau en base sèche du grain.
2. $T(x,t)$: la température des grains ($^{\circ}\text{C}$).
3. $H(x,t)$: l'humidité absolue de l'air (kg.m^{-3}).
4. $T_a(x,t)$: la température de l'air ($^{\circ}\text{C}$).

Pour se faire, nous utiliserons 4 équations différentielles que l'on obtient via un bilan d'énergie sur l'air, sur le grain, un bilan d'humidité de l'air ainsi que l'équation de séchage d'une couche mince.

Bilan d'énergie sur l'air ventilé

L'enthalpie de l'air entrant dans le volume Sdx pendant la période dt est :

$$(\rho_a v_a C p_a + \rho_a v_a C p_v H). T_a. S. dt \quad (1)$$

L'enthalpie de l'air sortant du volume Sdx pendant la période dt est :

$$(\rho_a v_a C p_a + \rho_a v_a C p_v H). (T_a + \frac{\partial T_a}{\partial x} dx). S. dt \quad (2)$$

On obtient ainsi en soustrayant (1) à (2) :

$$(\rho_a v_a C p_a + \rho_a v_a C p_v H). \frac{\partial T_a}{\partial x}. dx. S. dt$$

De la même façon, la variation totale de chaleur de l'air est :

$$(\rho_a C p_a + \rho_a C p_v H). \left(v_a. \frac{\partial T_a}{\partial x} + \varepsilon. \frac{\partial T_a}{\partial t} \right). dx. S. dt$$

Cette variation thermique est égale à la chaleur transmise de l'air au grain :

$$q = -h. a. (T_a - T). S. dx. dt$$

Ainsi on obtient le bilan d'enthalpie final :

$$\left(v_a. \frac{\partial T_a}{\partial x} + \varepsilon. \frac{\partial T_a}{\partial t} \right) = \frac{-h. a. (T_a - T)}{(\rho_a C p_a + \rho_a C p_v H)} \quad (3.5)$$

Brooker et al. (1974), l'auteur de ce modèle stipule que le terme de variation temporelle peut être négligé devant le terme de variation spatiale ainsi :

$$\frac{\partial T_a}{\partial x} = \frac{-h.a.(T_a - T)}{(G_a C p_a + G_a C p_v H)} \quad (3.6)$$

Bilan d'énergie sur le grain

L'enthalpie des grains de maïs dans le volume Sdx au temps t et $t + dt$ est donné par :

$$(\rho C p + C p_{eau} M). T. S. dx$$

$$(\rho C p + C p_{eau} M). (T + \frac{\partial T}{\partial t} dt). S. dx$$

Durant la période dt , une partie de l'humidité s'évapore, ce qui provoque un changement dans l'humidité de l'air. L'enthalpie nécessaire à cette évaporation est :

$$h_v. G_a. \frac{\partial H}{\partial x}. S. dx. dt$$

La quantité d'eau qui sera évaporée à la surface des grains doit dans un premier temps être à la température de l'air. Voici l'énergie requise pour cette augmentation de température :

$$C p_v. (T_a - T). G_a. \frac{\partial H}{\partial x}. S. dx. dt$$

On obtient alors le bilan final suivant :

$$h. a. (T_a - T) = (\rho C p + C p_{eau} M). \frac{\partial T}{\partial t} - [h_v + C p_v (T_a - T)]. G_a. \frac{\partial H}{\partial x}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{h.a.(T_a - T)}{(\rho(Cp + Cp_{eau}M))} + \frac{[h_v + Cp_v(T_a - T)]}{(\rho(Cp + Cp_{eau}M))}. G_a. \frac{\partial H}{\partial x} \quad (3.7)$$

Bilan sur le rapport d'humidité de l'air

La quantité de vapeur d'eau entrant par la surface S en x et sortant en $x+dx$ pendant dt est :

$$G_a S H dt \quad \text{et} \quad G_a S \left(H + \frac{\partial H}{\partial x} \right) dt$$

La variation du rapport d'humidité de l'air dans l'espace vide du volume $S dx$ est :

$$\varepsilon \cdot \rho_a \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \cdot S \cdot dx \cdot dt$$

Et la variation de teneur en eau des grains pendant le temps dt est :

$$\rho \cdot \frac{\partial M}{\partial t} \cdot S \cdot dx \cdot dt$$

Le bilan final d'échange d'humidité entre le grain et l'air est :

$$\rho \cdot \frac{\partial M}{\partial t} \cdot S \cdot dx \cdot dt = \varepsilon \cdot \rho_a \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \cdot S \cdot dx \cdot dt - G_a \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \cdot S \cdot dx \cdot dt$$

Brooker et al. (1974) néglige la variation temporelle de l'humidité relative de l'air. Ainsi l'équation finale revient à :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = - \frac{G_a}{\rho} \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \quad (3.8)$$

Équation de la couche mince

L'équation de la couche mince est utilisée pour décrire la cinétique de séchage d'un grain unique exposé à un flux d'air. Bien que le séchage en silo implique une interaction entre plusieurs grains, cette approche permet de déterminer des lois de séchage globales en fonction des conditions thermiques et hydriques du milieu. Il existe de nombreuses équations de séchage de la couche mince. Elles peuvent être de type empirique, théorique ou bien encore semi-théorique. Cependant, les plus utilisées restent encore les équations empiriques.

Pour le séchage du maïs en lit stationnaire, les modèles à privilégier peuvent légèrement varier en fonction des conditions spécifiques (par exemple, le flux d'air, la température, etc.). Voici le Tableau 3.3 qui présente les modèles les plus appropriés à ce contexte. On introduit alors le terme MR, la masse réduite, grandement utilisé dans le domaine du séchage :

$$MR = \frac{(M - M_e)}{(M_o - M_e)} \quad (3.9)$$

Tableau 3.3 Différents modèles semi-empiriques développés pour le séchage de la couche mince des céréales
Tiré de Pabis et al. 1998

Modèle	Équation
Page	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$
Pabis-Henderson	$MR = -\psi \cdot K \exp(-K \cdot t)$
Deux Termes	$MR = a \cdot \exp(-k_1 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_2 \cdot t)$
Midilli-Kucuk	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$

- Le modèle de Page (Pabis et al. 1998) est toujours pertinent, même dans un lit stationnaire, car il peut bien capturer la cinétique de séchage non linéaire du maïs. Dans un lit stationnaire, où le transfert de chaleur et de masse est relativement homogène, ce modèle reste efficace pour décrire le taux de réduction de l'humidité.
- Modèle de Henderson et Pabis (Pabis et al. 1998): ce modèle est très adapté pour modéliser le séchage dans des systèmes comme les lits stationnaires, où l'on peut observer un comportement initial de séchage rapide suivi d'une diminution plus lente. Le fait qu'il soit simple et suffisamment précis en fait un bon candidat pour des analyses préliminaires ou des systèmes où la simplicité est une priorité.
- Modèle de Deux Termes (Pabis et al. 1998) : dans un lit stationnaire, le maïs est souvent exposé à des conditions de séchage qui peuvent varier légèrement à travers le lit (par exemple, des variations de température ou de flux d'air), ce qui peut entraîner des phases de séchage distinctes. Le modèle de Deux Termes est bien adapté pour capturer cette variabilité, particulièrement utile pour modéliser les gradients d'humidité au sein du lit.
- Modèle de Midilli et Kucuk (Pabis et al. 1998): il offre une grande flexibilité pour modéliser le séchage du maïs en lit stationnaire, en prenant en compte les non-linéarités

et les possibles variations dans la vitesse de séchage à différentes couches du lit. Le terme additionnel permet de mieux s'adapter aux données expérimentales complexes, souvent observées dans des lits stationnaires où la diffusion interne d'humidité joue un rôle crucial.

Parmi les différents modèles empiriques décrivant la cinétique de séchage du maïs, nous avons retenu l'équation de la couche mince de Henderson et Pabis, qui offre un bon compromis entre simplicité et précision pour représenter l'évolution de la teneur en eau au cours du temps.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\psi \cdot K(M_o - M_e) \exp(-K \cdot t) \quad (3.10)$$

Avec :

M_o : la teneur en eau initiale en base sèche du grain

M_e : la teneur en eau à l'équilibre en base sèche du grain

Les coefficients associés à cette équation varient selon l'hypothèse quant à la forme considérée pour un grain. Pour le maïs on suggère deux formes différentes, la sphère et le parallélépipède rectangle.

Paramètres des équations

Dans l'équation de séchage en couche mince choisie, plusieurs paramètres interviennent, notamment K et ψ . Ces paramètres dépendent de la géométrie des grains considérée. Leur calcul est détaillé dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 Paramètres géométriques du grain
Tiré de Pabis et al. 1998

Géométrie	K	Ψ
Parallélépipède rectangle	$\frac{\pi^2}{4} D_m \left(\frac{1}{s^2} + \frac{1}{l^2} + \frac{1}{w^2} \right)$	$\frac{512}{\pi^6}$

Sphère	$\frac{\pi^2}{R^2} D_m$	$\frac{6}{\pi^2}$
--------	-------------------------	-------------------

Le coefficient de diffusion massique D_m contrôle la vitesse à laquelle l'humidité migre à l'intérieur du grain. Il suit une loi de type Arrhenius (cf. Equation 8). Cette relation traduit le fait qu'à basse température, l'eau est plus fortement liée aux structures internes du grain, rendant sa diffusion plus lente. À haute température, l'énergie thermique surmonte ces liaisons, accélérant la migration de l'humidité.

$$D_m = D_0 \exp \left(-\frac{E_a}{R(T+273,15)} \right) \quad (3.11)$$

Où :

D_0 : un facteur pré-exponentiel ($m^2.s^{-1}$).

E_a : l'énergie d'activation ($kJ.mol^{-1}$).

R : la constante universelle des gaz ($kJ.mol^{-1}.K^{-1}$).

T : la température en $^{\circ}C$.

Les valeurs de D_0 sont obtenues par régression linéaire à partir des données expérimentales de MR et du temps de séchage. Pour des températures supérieures à $30^{\circ}C$, Pabis propose :

$$D_0 = 4,89.10^{-8} m^2/s.$$

3.2 Conclusion

Les équations maintenant posées et associées à leurs hypothèses respectives, il est temps de les intégrer dans la programmation de l'automate cellulaire. Le prochain chapitre se consacre à l'implémentation successive de la conduction, convection et diffusion d'humidité dans l'outil de modélisation.

CHAPITRE 4 MODELISATION PAR UN AUTOMATE CELLULAIRE

Les équations établies dans la section précédente constituent le socle théorique du modèle de séchage développé. Il est maintenant nécessaire de les traduire en un modèle numérique opérationnel, capable de simuler l'évolution de la température et de l'humidité du grain. Cette section décrit l'implémentation de ces équations dans un automate cellulaire, en détaillant les méthodes de discrétisation et les choix numériques réalisés.

4.1 Construction des automates cellulaires

Lors de la création d'un AC, le premier paramètre à choisir est la dimension de la grille. Celle-ci peut être linéaire, 2D, ou 3D, comme le montre la Figure 4.1. Choix qui dépend bien entendu du contexte et de l'utilisation. Puis il s'agit de choisir le type de maillage que l'on utilisera. Le quadrillage avec des cellules carrés est le plus connu et le plus utilisé, mais il en existe d'autres type comme le montre la Figure 4.2.

Après le choix du type de tessellation, il faut décrire les interactions des cellules entre elles, autrement dit le voisinage utilisé. Le nombre de voisins pris en compte impliquera le nombre d'interactions à calculer. La Figure 4.3 ci-dessous, propose différents types de voisinages, qui peuvent être étendus.

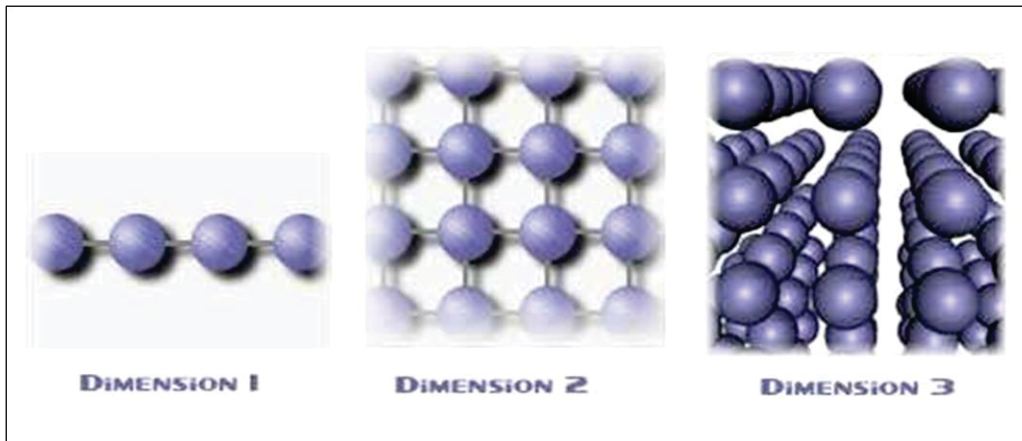


Figure 4.1 Dimensions que peut prendre un automate cellulaire
Tiré de Futura Sciences, 2003

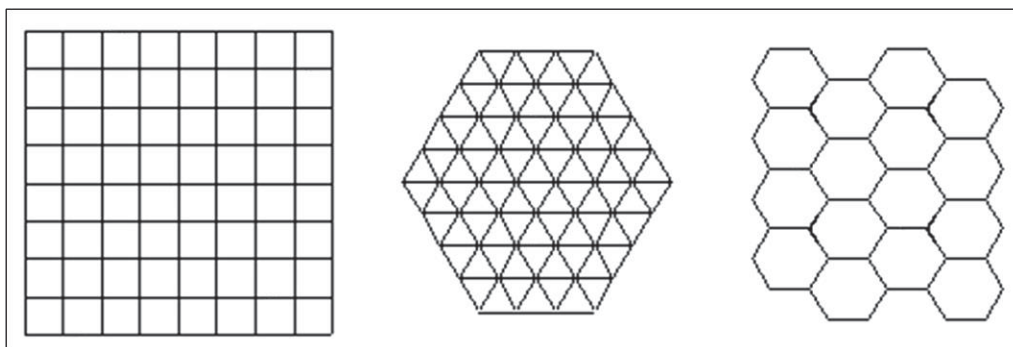


Figure 4.2 Exemples de maillage possibles pour un AC
Tiré de Futura Sciences, 2003

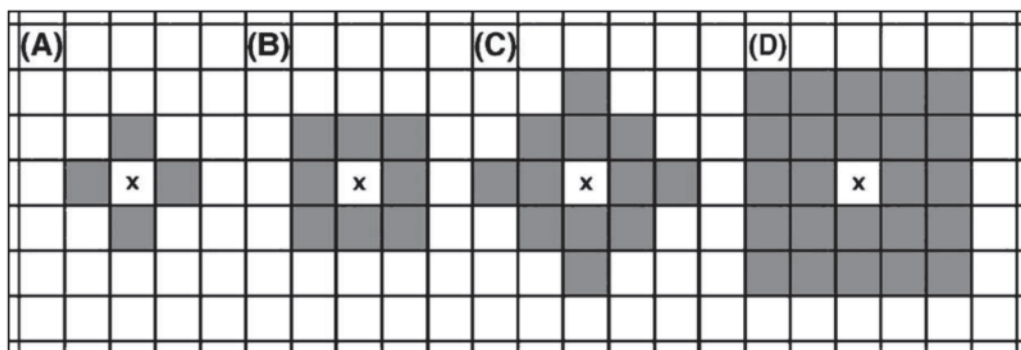


Figure 4.3 Voisinage de Von Neumann (A) et Von Neumann étendu (C), voisinage de Moore (B) et Moore étendu (D)
Tiré de Futura Sciences, 2003

Pour notre étude nous réaliserons différents automates cellulaires d'une complexité croissante, afin de s'appropriier le problème comme il se doit. Nous choisirons donc la représentation la plus adaptée aux hypothèses des différents problèmes. La Figure 4.4 propose une représentation du silo vu comme une grille d'AC.

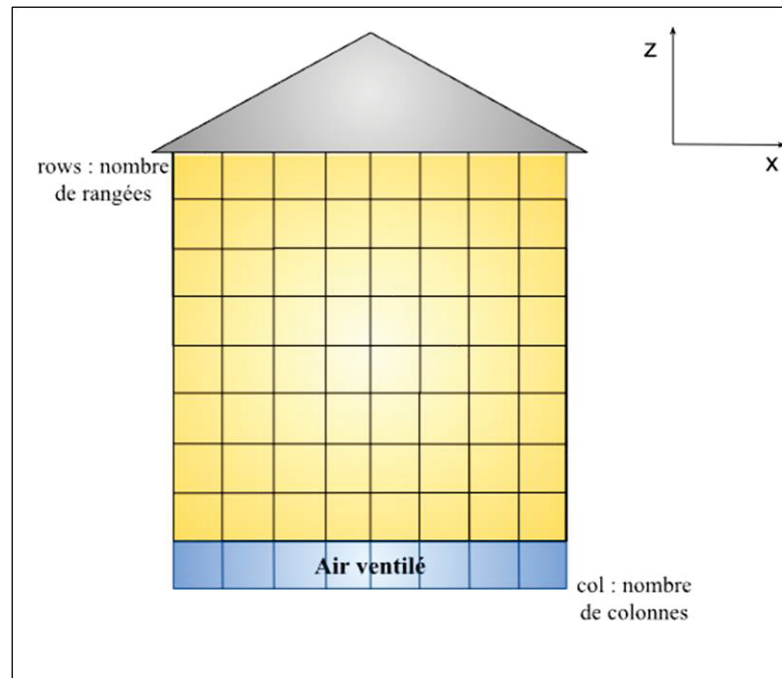


Figure 4.4 Représentation du silo comme un automate cellulaire

On utilisera le voisinage de Neumann pour régir les interactions entre les différentes cellules de grain. Au cours de l'étude, nous serons amenés à réaliser différents AC en variant les conditions initiales de la grille. Lorsque nous pourrons considérer les transferts comme unilatéraux l'AC sera 1D, tandis que dans les autres cas, il sera en 2D.

Chaque cellule de l'AC est un lot de grain défini par :

- ses caractéristiques physiques : sa taille, sa masse volumique, la forme de ses grains, le rapport air/volume des grains.
- ses caractéristiques thermiques : sa température, sa conductivité, sa capacité calorifique, sa diffusivité.

Changer les paramètres de ces cellules permet de modéliser des problèmes différents, en intégrant l'hétérogénéité qu'il peut y avoir au sein d'un silo comme des couches de grains plus chaudes, plus humides, avec des taux de poussières plus élevés, etc.

4.2 Implémentation du modèle de conduction

Pour construire l'automate cellulaire de conduction, c'est l'équation de chaleur sans terme source qui a été utilisée :

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\varphi) \quad (4.1)$$

Avec $\varphi = \frac{\Delta T}{R}$ qui représente le flux thermique, R la résistance thermique (W.m^{-2}) et ΔT est la différence de température entre une cellule voisine et la cellule étudiée.

Cette équation a été discrétisée afin de pouvoir implémenter les règles d'interaction de l'automate (cf. Equation 4.1). Pour simplifier la compréhension des différents échanges thermiques, ils ont été indexés de leur localisation spatiale (N, S, E, O) par rapport à la cellule centrale C (cf. Figure 4.5).

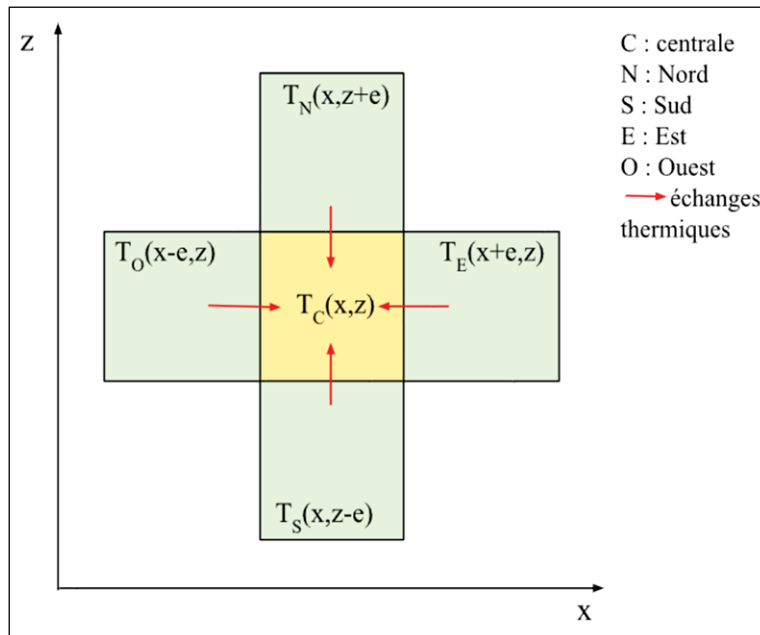


Figure 4.5 Représentation de la discrétisation de l'espace

$$T_C^{g+1} = T_C^g + \frac{\Delta t}{e \cdot \rho_C \cdot C_{pC}} (\varphi_S - \varphi_N + \varphi_W - \varphi_E) \quad (4.2)$$

g : la génération étudiée

e : la taille prédéfinie des cellules de l'AC

ρ_C : la masse volumique du grain C

C_{pC} : la capacité calorifique du grain C

Résoudre des équations en les discrétisant implique de respecter certains critères, notamment celui de stabilité, qui permettra au programme de converger vers des résultats cohérents en imposant une valeur limite du pas de temps Δt . La condition à respectée (cf. Tordeux et al. 2021) est celle du nombre de Fourier F_o (cf. Equation 4.3).

$$F_o = \frac{\max(a_i)}{\Delta t \cdot e^2} < \frac{1}{2} \quad (4.3)$$

Avec a_i : la diffusivité thermique de la cellule i .

Une fois le modèle implémenté nous avons pu simuler différents lots de conditions initiales, dans un premier temps en examinant un silo homogène puis un silo hétérogène.

4.2.1 Résultats de la simulation de la conduction au sein d'un silo homogène

Dans un premier temps, le silo a été considéré homogène, ce qui implique que chacune des cellules de l'AC possède les mêmes caractéristiques et notamment la même température à l'état initial.

Afin de modéliser le chauffage par le bas du silo, on considère que la première couche de grain au bas est à la température de chauffage désirée, c'est ce que l'on voit particulièrement bien dans la Figure 4.6 A). La température des parois est quant à elle, supposée constante égale à 18 °C. La température initiale du grain a été fixée à 18 °C et celle de chauffage à 50 °C.

La Figure 4.6 présente 3 captures d'image d'une animation montrant l'évolution du silo au cours du temps. On peut y voir ce que renvoie la simulation pour 1, 50 et 90 jours en ne prenant que la conduction en compte. La température augmente de façon parabolique dans le silo, avec

un pic de chaleur au centre, les parois étant plus froide. On remarque aussi que le grain chauffe très lentement. A 90 jours, il n'y a que le premier tier inférieur de grain qui a chauffé, et seulement de 10 °C.

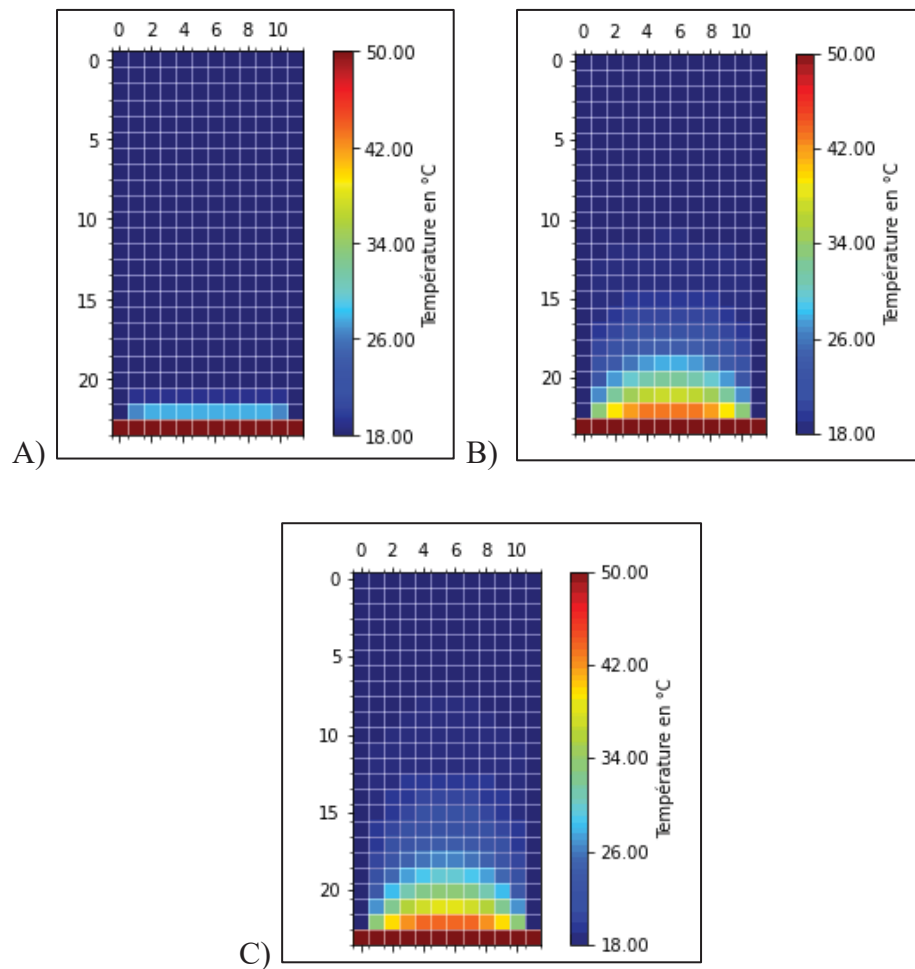


Figure 4.6 Affichage de la grille représentant le silo lors de l'exécution de l'AC de la conduction pour 3 générations : A) 1 jour, B) 50 jours, C) 90 jours

La Figure 4.7 quant à elle, montre la grande disparité de température des grains. La deuxième couche s'élève très vite en température (seulement 300 heures pour atteindre 30 °C), tandis que la couche du milieu peine à prendre un degré supplémentaire. Les échanges se font très lentement.

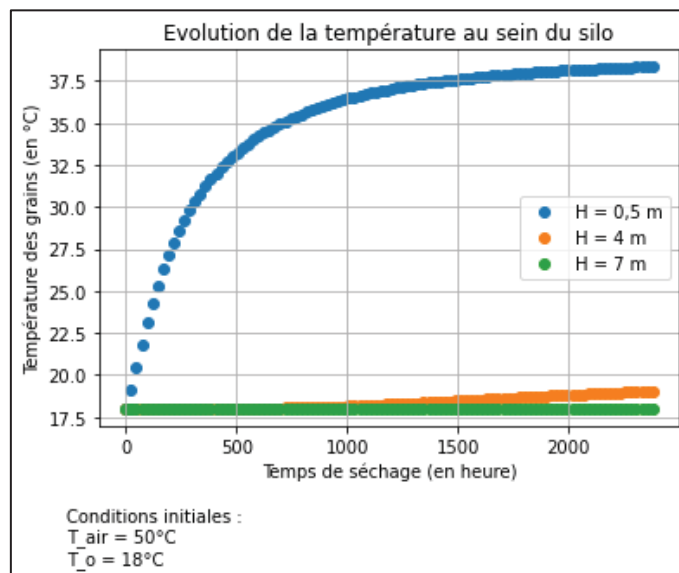


Figure 4.7 Evolution de la température dans un silo homogène durant 150 jours

4.2.2 Résultats de la simulation de la conduction au sein d'un silo hétérogène

Afin de s'adapter à différents contextes d'utilisation, on a créé un automate cellulaire qui prend pour conditions initiales un silo hétérogène, c'est-à-dire que certaines couches ou zones de grains ne sont pas à la même température ou humidité que le reste. Comme précédemment, on a réalisé 3 captures d'image lors de l'exécution de l'AC, pour 1 jour, 50 jours et 90 jours. Cette simulation montre que l'automate répond correctement à la modification d'un silo homogène pour un silo hétérogène. L'évolution de la température des céréales semble cohérente. On peut voir sur cette figure la propagation de chaleur par le bas via la première couche chauffée par le ventilateur, mais aussi une seconde propagation de chaleur depuis la couche supérieure chaude vers l'intérieur du silo. La Figure 4.8 montre l'évolution de ces deux vagues de chaleur aux différentes hauteurs de grain. Les différentes grilles de la Figure 4.8 permettent de voir cette évolution temporelle de propagation des 2 vagues de chaleurs du haut et du bas du silo.

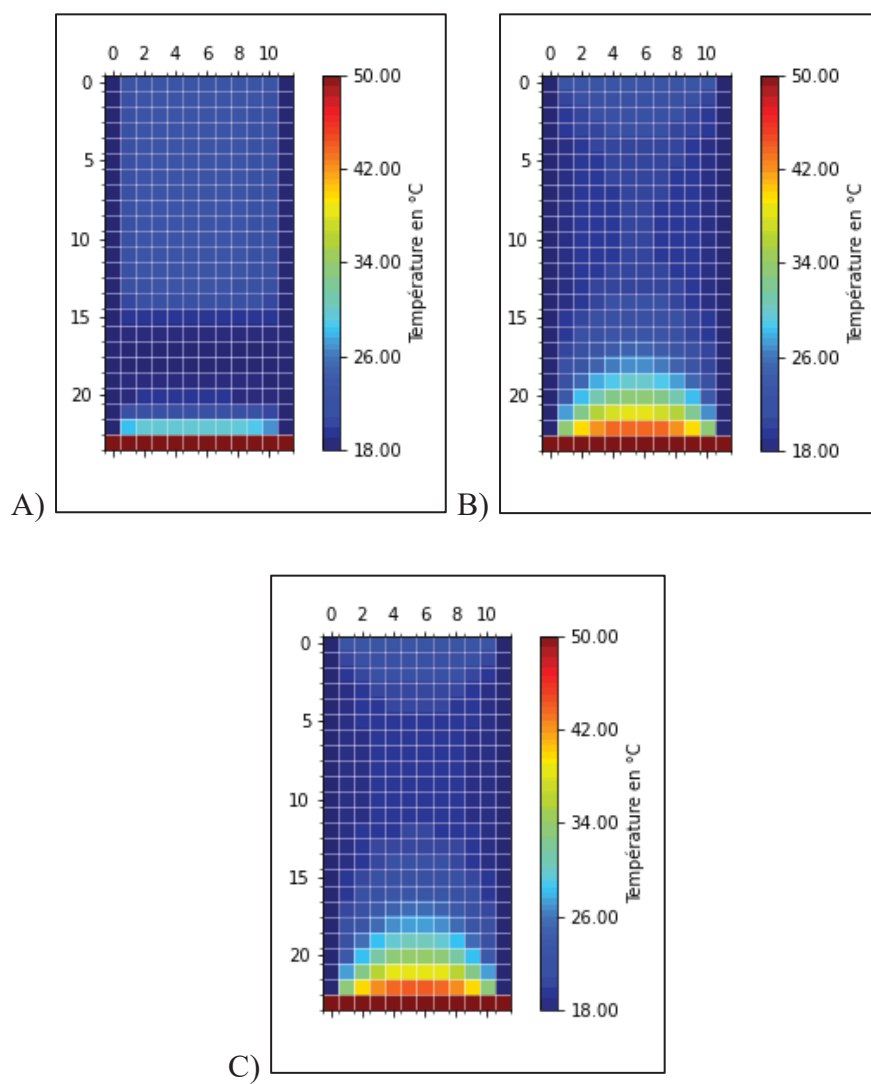


Figure 4.8 Exécution de l'AC de conduction pour un silo avec une couche supérieure chaude (23 °C) pour 3 générations : A) 1 jour, B) 50 jours, C) 90 jours

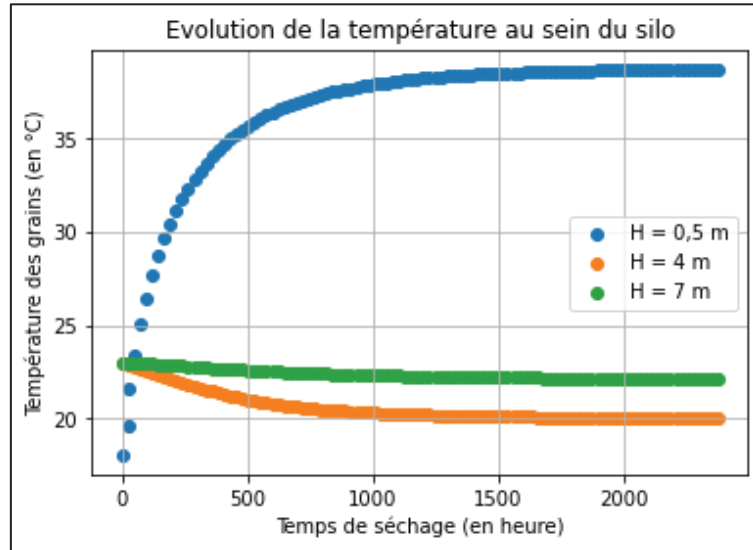


Figure 4.9 Evolution de la température au sein d'un silo hétérogène pendant 150 jours, lors de l'exécution de l'AC de conduction

4.3 Implémentation du modèle de convection

Suite à la conduction, c'est à la convection d'être implémentée dans l'automate cellulaire.

Voici la discrétisation de l'équation 2 définie dans le chapitre 3 :

$$T_i^{g+1} = T_i^g - \frac{aB_i\Delta t}{e^2}(T_i^g - T_{ventilo}) + \frac{a\Delta t}{\Delta z^2}(T_{i+1}^g - 2T_i^g + T_{i-1}^g) \quad (4.4)$$

Avec :

B_i : le nombre de Biot

a : la diffusivité thermique (m^2/s)

g : la génération étudiée

i : la ligne de l'AC étudiée

$T_{ventilo}$: la température de l'air ventilé

Δz : pas spatial, ici e , la taille choisie pour les cellules de l'AC

$$B_i = \frac{eh}{k_{air}} \quad a = \frac{k_{air}}{\rho c_p} \quad (4.5)$$

Avec :

h : le coefficient de convection thermique ($W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$)

k_{air} : la conductivité thermique de l'air à une température donnée ($W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)

Conditions de stabilité :

Lorsque l'on discrétise cette équation, on ne peut se permettre de choisir un delta de temps trop grand. En effet, cela engendrerait l'instabilité du calcul numérique.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta z^2}{2aD}$$

Avec D la dimension du problème, ici monodimensionnel donc $D = 1$.

Cependant puisque nous sommes dans le cas d'un transfert linéaire, une nouvelle condition de stabilité est établie (cf. Tordeux et al. 2021) :

$$\Delta t \leq \frac{\Delta z^2}{2a} * \frac{1}{1 + \frac{Bi}{rows-1}} \quad (4.6)$$

4.3.1 Résultats de la simulation de la convection au sein d'un silo homogène

Comme pour la simulation du silo homogène de la section 4.2.1, on initialise l'AC de sorte à avoir la température de la première couche égale à celle de l'air ventilé. En dehors de cette couche, le silo entier est à une température de 18 °C.

La Figure 4.10 présente l'état du silo après 50 heures et 90 heures de chauffage par convection. Le silo atteint une température de près de 40 °C quelque soit la hauteur au bout des 90 heures. Dans la section 4.2.1 on observait que la conduction au bout de 90 jours, ne menait quant à elle qu'à un réchauffement de 10 °C du bas du silo. La convection apparaît donc comme le phénomène majoritaire lors du chauffage des grains. La Figure 4.11 montre les différents paliers de température qui apparaissent dans le silo au cours du séchage. Conformément aux attentes, le bas du silo chauffe plus vite que le haut du silo, puisque l'air a eu le temps de se refroidir en rechauffant les grains du bas avant.

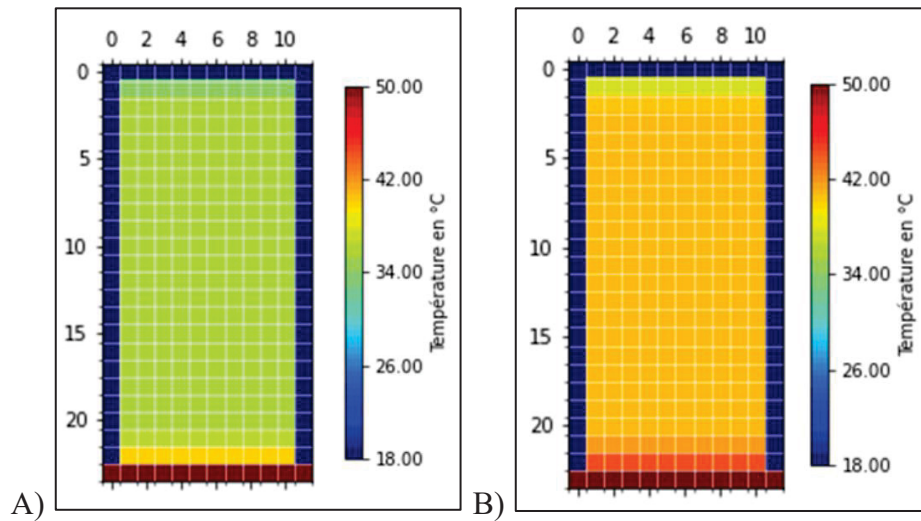


Figure 4.10 Evolution de la température des grains dans un silo homogène lors de l'exécution de l'AC de convection au bout de A) 50 heures et B) 90 heures

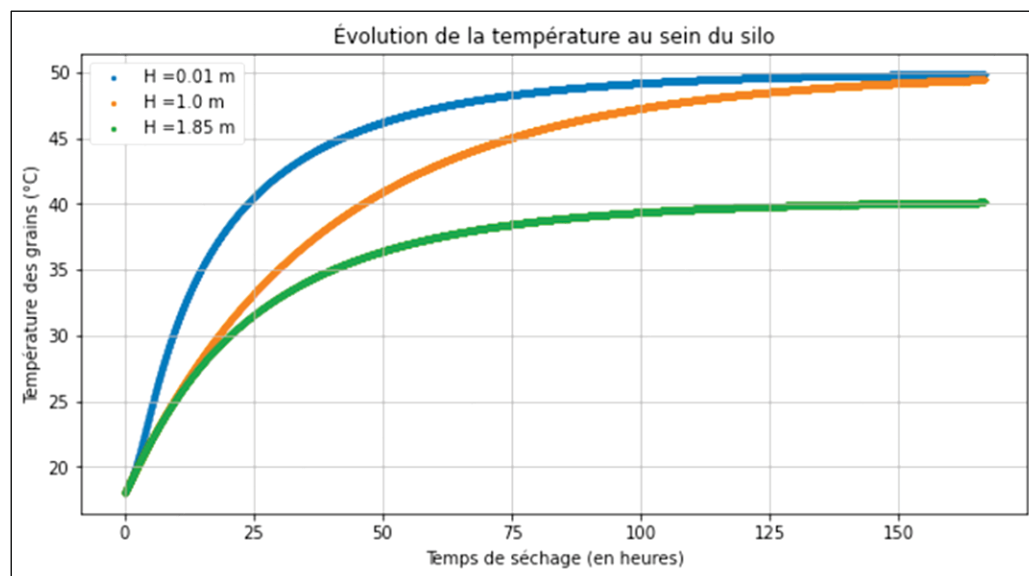


Figure 4.11 Evolution de la température dans un silo homogène en prenant en compte les transferts thermiques de convection et conduction

Afin d'étudier l'importance de la convection par rapport à la conduction, un autre graphique a été tracé montrant l'évolution du nombre de Biot à différentes hauteurs de grain dans le silo Figure 4.12. Bi décroît au fur et à mesure des générations, et beaucoup plus rapidement pour les couches inférieures du silo. On constate qu'avec ce réglage de paramètres, le silo est toujours associé à un système épais ($Biot > 0,1$) même si le nombre de Biot reste très faible. Le fait que Bi diminue avec le temps suggère que la résistance thermique interne (conduction)

devient de plus en plus importante par rapport à la convection au fil du séchage. C'est cohérent car les grains prennent plus de temps à la fin du séchage à perdre de l'humidité, en effet il est plus dur pour l'eau de se déplacer du centre du grain vers l'extérieur, que depuis les bords de la graine.

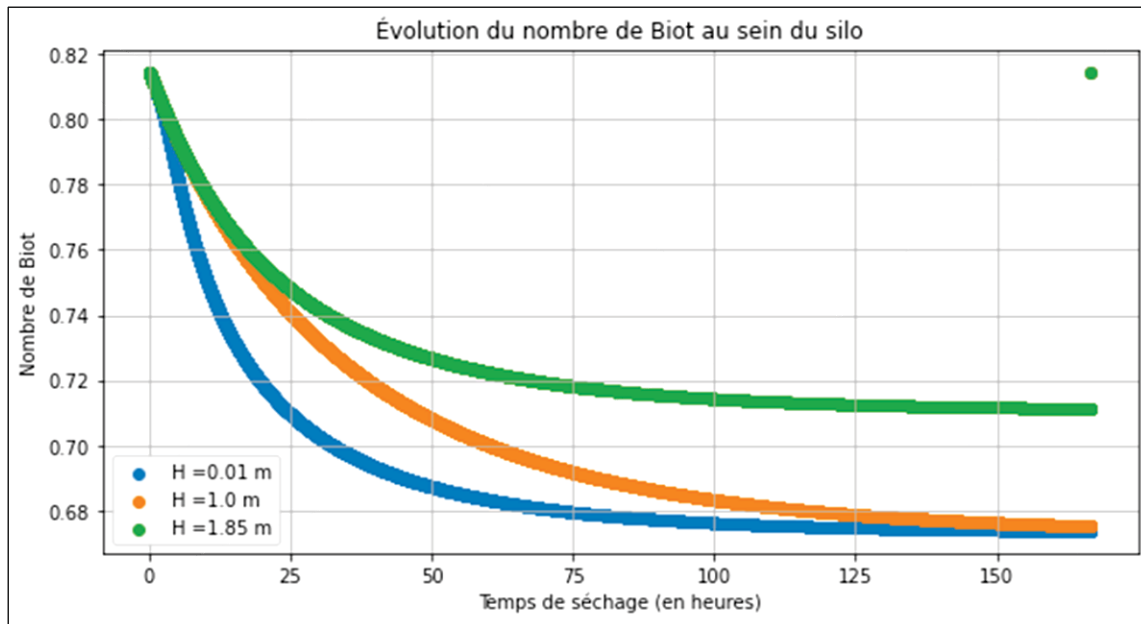


Figure 4.12 Evolution du nombre de Biot pour l'exécution de l'AC de convection dans un silo homogène

4.3.2 Résultats de la simulation de la convection au sein d'un silo hétérogène

Comme pour le modèle de conduction, on simule un silo hétérogène, avec une couche supérieure de 23 °C. La Figure 4.13 présente l'état du silo après 1 heure (A), 50 heures (B) puis 90 heures (C) de ventilation chauffée.

La température augmente très rapidement dans le silo. Il ne faut que 90 heures pour que le silo complet est une température environnant les 30 °C tandis qu'en 90 jours de conduction seule (cf. Figure 4.8) seulement la couche inférieure du silo avait chauffée et atteint la même température.

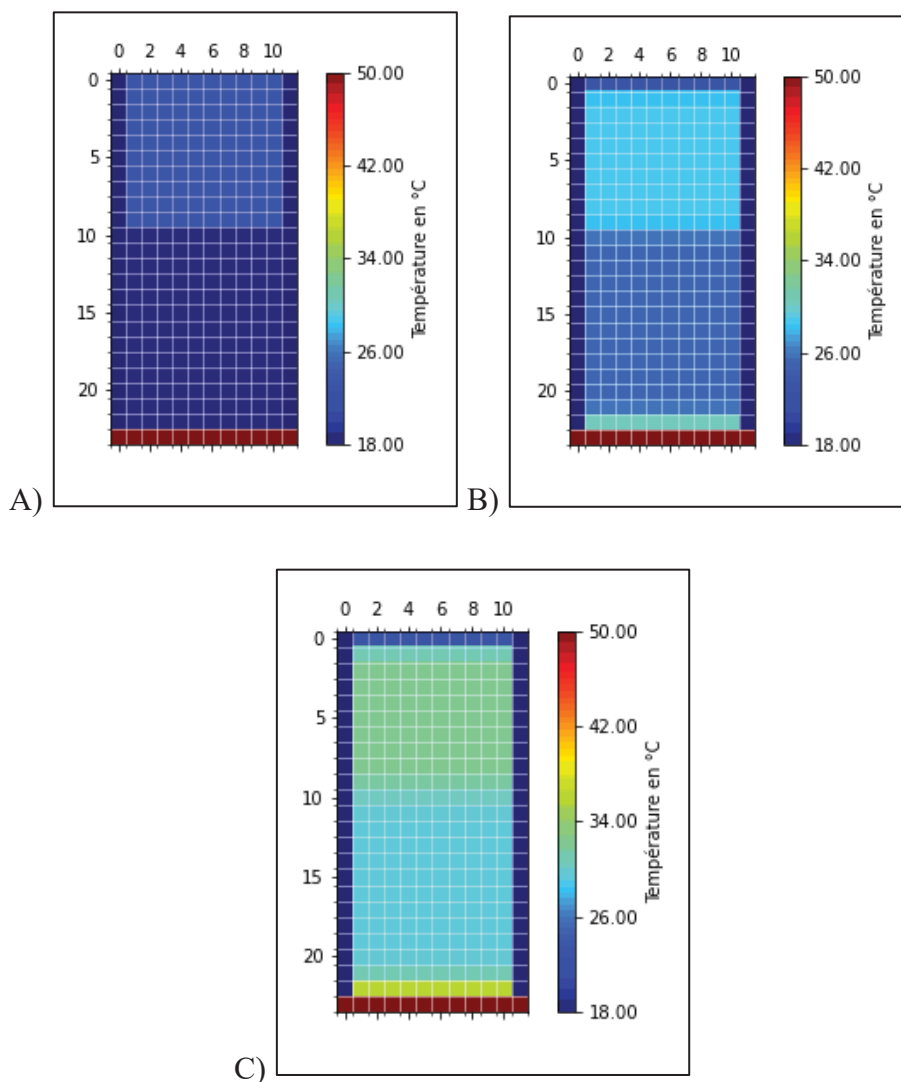


Figure 4.13 Affichage de la grille représentant le silo avec une couche supérieure chaude (23°C) lors de l'exécution de l'AC de la convection pour 3 générations : A) 1 heure, B) 50 heures, C) 90 heures

4.4 Implémentation de la diffusion d'humidité

Cette fois-ci c'est la diffusion d'humidité qui sera ajouté à la convection afin de modéliser plus fidèlement les transferts thermiques et massiques prenant place lors du séchage. En ajoutant ce processus, on s'attend à voir le temps de propagation de la chaleur dans le silo diminuer fortement. En effet, l'énergie calorifique sert désormais à l'évaporation de l'eau contenue dans les grains, et non plus seulement à augmenter leur température.

4.4.1 Équations des humidités

Lors de cette étude, il est important de faire la distinction entre les différents types de teneur en eau dont on discute. En effet, il est d'usage d'utiliser l'humidité relative lorsque l'on parle de la teneur en eau de l'air, mais l'humidité absolue dans les équations. De même, on utilise l'humidité en base humide lorsque l'on parle de la teneur en eau des grains dans l'agriculture, mais au sein des équations, on utilise l'humidité en base sèche. Il convient donc de savoir faire la distinction entre ces grandeurs et de connaître les relations qui les lient. Le Tableau 4.1 présente ces grandeurs afin d'aider le lecteur dans la compréhension des résultats.

Tableau 4.1 Différentes mesures d'humidité utilisées

Nom	Équation	Définition
Humidité relative (%)	$HR = 100 \cdot \frac{e}{e_s}$	Rapport entre la quantité de vapeur d'eau dans l'air et la quantité maximale que l'air peut contenir à une température donnée.
Humidité absolue (kg.m ⁻³)	$H = \frac{m_w}{V}$	Masse de vapeur d'eau contenue dans un volume donné d'air sec.
Humidité base sèche (kg(H ₂ O).kg ⁻¹)	$H_{db} = \frac{H_{wb}}{100 - H_{wb}}$	Rapport entre la masse d'eau et la masse de matière sèche du produit.
Humidité base humide (%)	$H_{wb} = 100 \cdot \frac{H_{db}}{1 + H_{db}}$	Rapport entre la masse d'eau et la masse totale (eau + matière sèche) du produit.

Légendes des symboles :

m_w : masse de vapeur d'eau (kg)

V : volume d'air m³

e : pression partielle de la vapeur d'eau (Pa)

e_s : pression de saturation de la vapeur d'eau (Pa)

4.4.2 Codage

4.4.2.1 Discrétisation

Nous utilisons une discrétisation explicite pour simplifier l'implémentation et limiter la complexité computationnelle. Cette approche permet d'actualiser l'état de chaque cellule à partir des états précédents de ses voisines, sans nécessiter de résolution matricielle globale. Cependant, cela impose des contraintes de stabilité, comme nous le verrons plus loin. L'ensemble des équations discrétisées sont rassemblées dans le Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Récapitulatif de la discrétisation des équations

Discrétisation	
1	$T_{a_{i+1,g}} = T_{a_{i,g}} - \Delta x \frac{h \cdot a \cdot (T_{a_{i,g}} - T_{i,g})}{(G_a C p_a + G_a C p_v H_{i,g})}$
2	$T_{i,g+1} = T_{i,g} + \frac{\Delta t}{\rho C p_{i,g}} \left(h \cdot a \cdot (T_{a_{i,g}} - T_{i,g}) + (h_v + C p_v (T_{a_{i,g}} - T_{i,g})) G_a \frac{H_{i+1,g} - H_{i,g}}{\Delta x} \right)$
3	$H_{i+1,g} = H_{i,g} - \Delta x \cdot \rho \cdot \frac{(M_{i,g+1} - M_{i,g})}{\Delta t \cdot G_a}$
4	$M_{i,g+1} = M_{i,g} - \Delta t \cdot \psi \cdot K (M_{i,g} - M_e) \exp(-K \cdot \Delta t)$

4.4.2.2 Stabilité et précision numérique

Afin de s'assurer de la stabilité du modèle, 2 critères y ont été implémentés. Le critère de Fourier et celui de Courant-Friedrich-Lewy (CFL).

Critère de Fourier :

$$Fo = \Delta t \frac{a}{\Delta x} < 0,5 \text{ et } \Delta t < \frac{\Delta x^2}{2a(1 + \frac{Bl}{rows-1})}$$

Critère de CFL :

Il est utilisé pour vérifier que les discrétisation temporelle et spatiale du modèle soient suffisamment fines pour garantir la stabilité numérique.

$$\frac{k_{grain} \cdot \Delta t}{\rho \cdot C_p \cdot \Delta x^2} \leq 1 \quad (4.7)$$

Où :

k_{grain} : la conductivité thermique du maïs ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

Δt : le pas de temps

Δx : la taille d'une case de l'automate cellulaire, ici e

ρ : masse volumique (kg.m^{-3})

C_p : capacité thermique spécifique ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

4.4.3 Résultats de la simulation de la diffusion d'humidité au sein d'un silo homogène

Pour se rapprocher le plus possible des conditions de séchage à air ventilé réelles, on modélise un silo plus haut (2,8 m) et une température d'air ventilé moindre : 25 °C. La vitesse de l'air d'entrée après le ventilateur est supposée être de 0,125 m.s^{-1} . L'humidité relative de l'air extérieure à l'entrée est supposée constante égale à 63 %. Le silo sera considéré comme homogène.

La Figure 4.14 montre que l'augmentation en température des grains est plus rapide dans les parties basses du silo. Ceci n'a pas changé par rapport aux modèles précédents. Toutes les couches de grains parviennent à converger vers la température 25 °C, soit la température de l'air chaud ventilé. Il faut environ 115 h pour que la couche à 11,2 cm du fond atteigne la température finale, tandis qu'il faut compter près de 150 h pour que celle à 2,74 m atteigne le même palier.

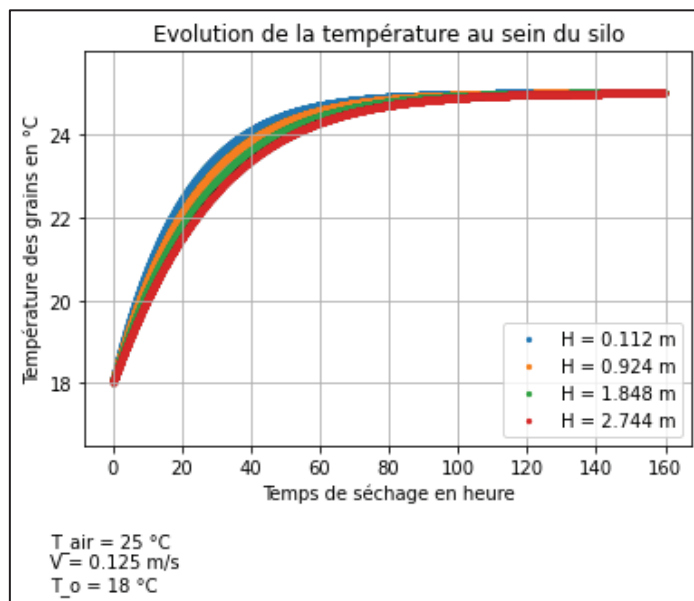


Figure 4.14 Évolution de la température des grains pour un silo homogène lors de l'exécution de l'AC de diffusion d'humidité

Dans le silo, c'est le transfert thermique de l'air vers le grain qui va sécher les céréales. Il va perdre en température afin de réchauffer le grain et permettre l'évaporation de l'eau que celui-ci contient. La Figure 4.15 présente trois courbes montrant la progression de la température de l'air au cours de son déplacement dans le silo. Au début du séchage, après 500 secondes, la température décroît fortement, le long du silo elle perd plus de 2 °C. Plus le temps passe, plus la chute de température se fait moins sévère, jusqu'à rester stable au bout de 104 h pour le haut du silo, lorsque la plus grosse partie de l'humidité s'est évaporée (cf. fin de la phase 2 du séchage, voir section 3.2). La température de l'air reste ensuite constante égales à celle d'entrée, ici 25 °C, le montre la Figure 4.15 au bout de 159 heures.

On observe qu'en effet l'ajout de la diffusion d'humidité dans l'AC, augmente grandement les temps de chauffage du grain. On raisonne désormais en centaine d'heure tandis que pour la convection (cf. section 4.3), on était de l'ordre de la dizaine d'heures. Les transferts de masse ralentissent le réchauffement du silo.

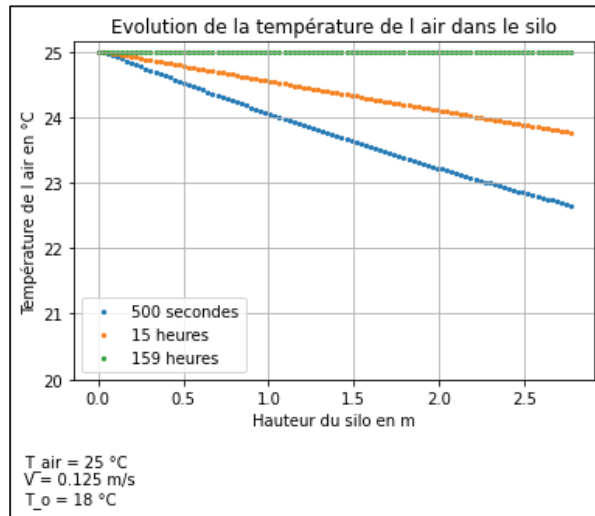


Figure 4.15 Température de l'air pour différentes hauteurs à des moments donnés

L'énergie transmise de l'air au grain, a mené à son élévation de température. L'eau contenue dans le grain peut maintenant s'évaporer. La teneur en eau du grain diminue (cf. Figure 4.16). On remarque une différence de l'évolution de teneur en eau pour des hauteurs de grain distinctes. L'humidité des céréales des couches supérieures diminue légèrement moins vite que celle des couches inférieures. Selon les conditions initiales (cf. Figure 4.16 (A comparé à B)), le phénomène peut être accentué. Pour un écart de température plus grand entre le grain et l'air, les paliers entre les différentes hauteurs sont plus différenciés.

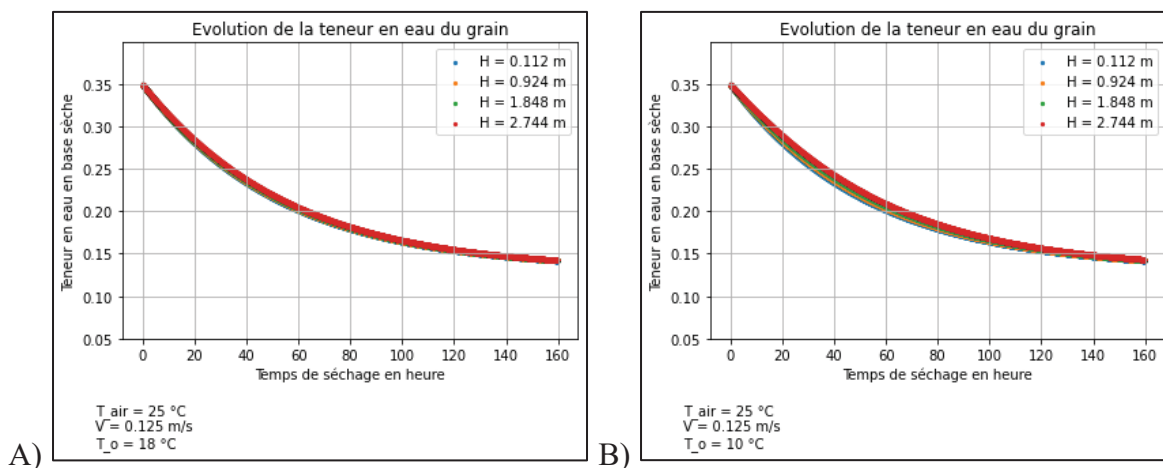


Figure 4.16 Teneur en eau du grain en base humide pour pour deux températures des grains initiales différentes A) $T_o = 18\text{ °C}$, B) $T_o = 10\text{ °C}$

Finalement on s'intéresse à l'allure de la courbe de vitesse de séchage qui est tracée pour deux endroits différents du silo dans la Figure 4.17. Comme le suggère les courbes d'humidité de la Figure 4.16, les vitesses de séchage sont quasiment confondues. Pour le haut du silo on observe un taux de séchage légèrement supérieur à celui du bas du silo sur le début. Le phénomène s'inverse par la suite, les grains du bas quasiment secs voient leur taux de séchage devenir plus petits que celui du haut. Ceci est dû au fait que l'eau restante au sein des grains du bas est celle en leur cœur, elle prend donc plus de temps à s'évaporer que celle contenue au sein des grains du haut plus sur les extérieurs.

Pour un écart de température entre les céréales et l'air plus important à l'état initial, on observe un écart plus grand entre les taux de séchage des différentes hauteurs du silo (cf. Figure 4.17 (A comparé à B)). Une étude plus approfondie, avec plus de simulations permettrait de mettre en lien l'écart entre la température de l'air et celle des céréales avec l'apparition de ce pallier.

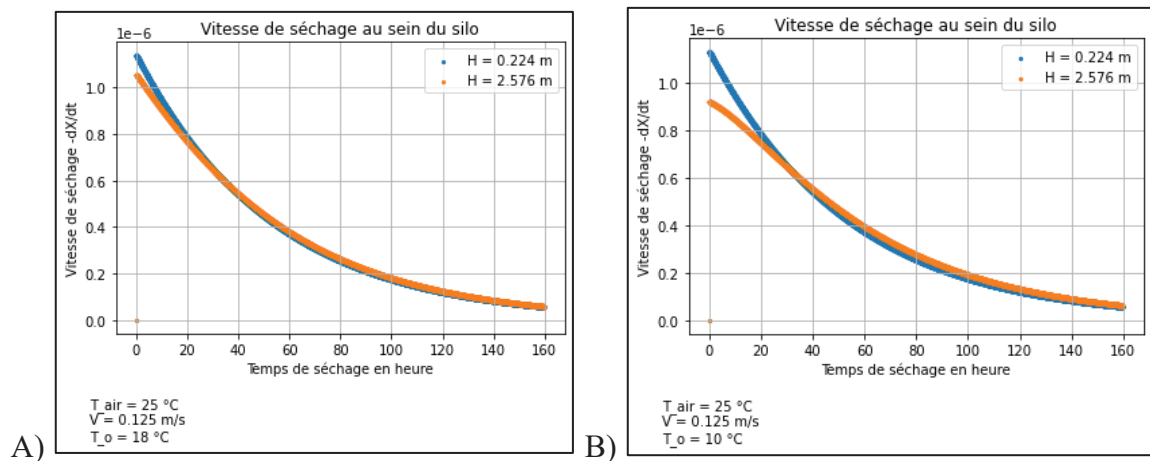


Figure 4.17 Vitesse de séchage (en s^{-1}) pour des températures de grain initialement différentes A) $T_o = 18 \text{ °C}$, B) $T_o = 10 \text{ °C}$

Le graphique B Figure 4.17 de la met bien en évidence les 3 phases du séchage présentées précédemment dans la section 3.1 : une 1^{ère} phase où le taux de séchage reste plutôt constant et à son maximum, une 2^{ème} phase où il chute complètement, et la 3^{ème} phase où il continue de diminuer beaucoup moins abruptement. Cela transcrit la facilité à retirer l'eau du grain dans un premier temps et les difficultés qu'on a à le sécher sur la fin.

Par la suite, pour une approche plus visuelle, des animations ont été créées. Chacune d'elle est un fichier au format GIF rassemblant des représentations de l'évolution d'une variable pour une génération. La Figure 4.18 propose deux captures d'écran : une représentation de la température dans le silo et une représentation de la teneur en eau (base sèche). On constate ainsi en parallèle qu'il y a deux fronts qui se déplacent de bas en haut : un front de température, et un front de séchage (évolution de l'humidité). Le premier est plus rapide que le deuxième, c'est à dire que les grains atteignent leur température finale plus rapidement que leur teneur en eau finale.

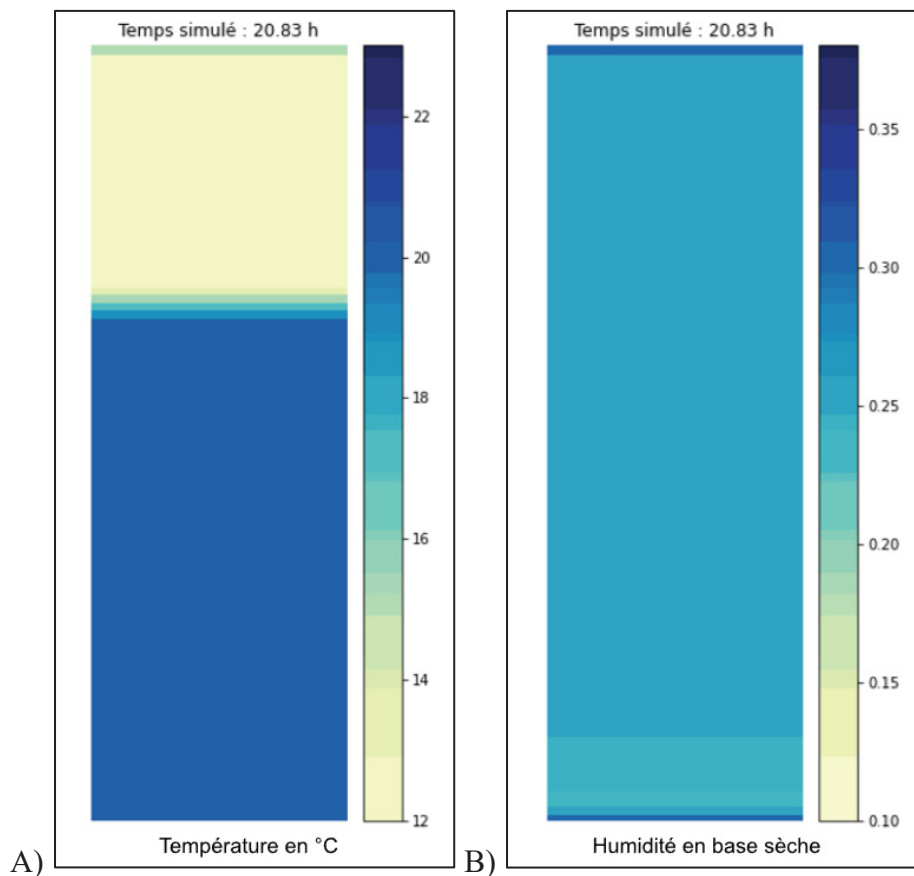


Figure 4.18 Affichage de la température (A) et de la teneur en eau en base sèche (B) du grain lors de l'exécution de l'AC de diffusion d'humidité au bout de 20,83 heures de séchage

4.4.4 Etude sur les différentes variables et paramètres

4.4.4.1 Considérations géométriques

Forme du grain

Dans les travaux qui portent sur le séchage un paramètre divise parfois les chercheurs : la forme géométrique considérée pour la modélisation des grains de maïs. La section suivante vise à comparer 2 séchages dans des conditions identiques, l'un avec un maïs sphérique et l'autre avec des grains parallélépipédiques. Les grains sont comparés à volume égal.

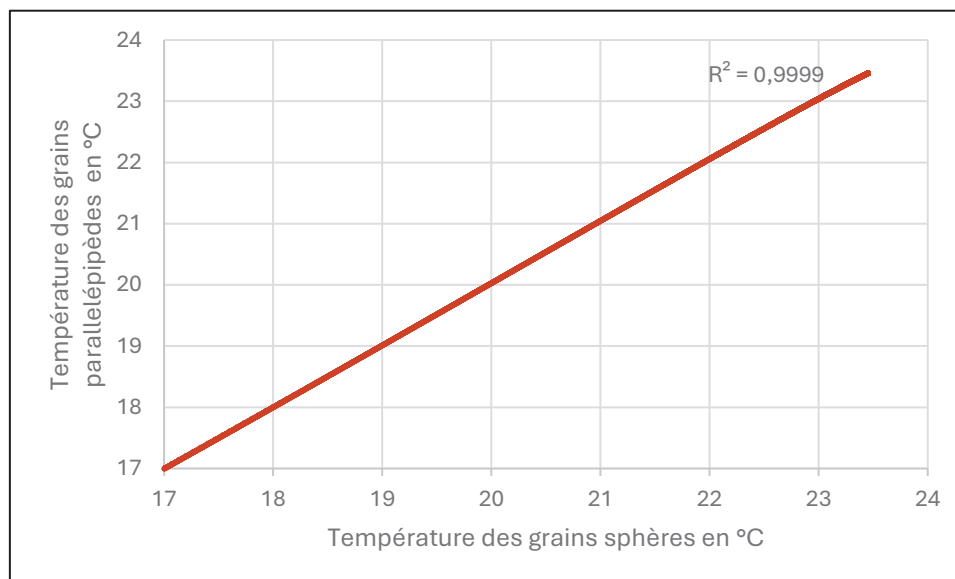


Figure 4.19 Analyse de l'impact de la forme géométrique du grain sur leur température

On a tracé la température des grain du modèle Parallélépipède en fonction de celle du modèle Sphère pour une hauteur de grain de 2,24 m pendant un séchage de 114 h. Comme on peut voir sur la Figure 4.19, la forme du grain n'impacte quasiment pas l'évolution de la température dans le temps, le coefficient de corrélation linéaire est de 0,9999.

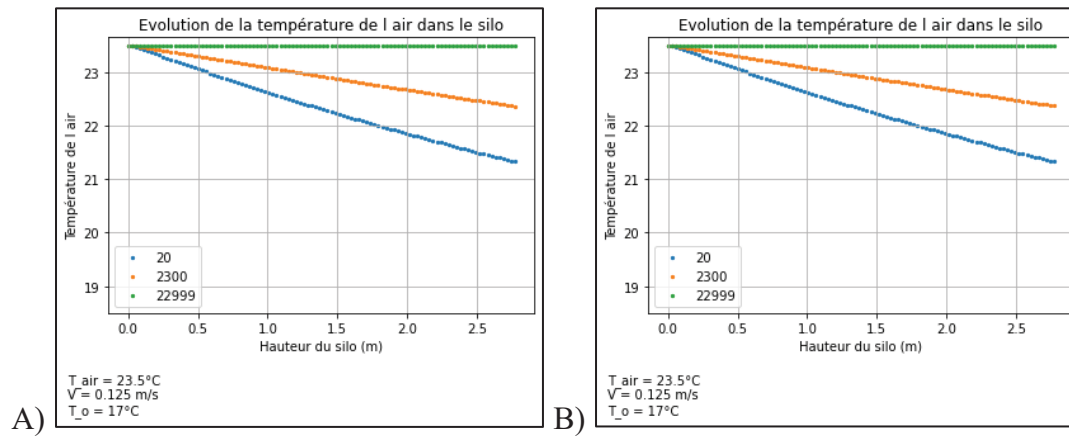


Figure 4.20 Evolution de la température de l'air ($^{\circ}\text{C}$) pour des formes de grain différentes A) modèle sphère, B) modèle parallélépipède

Pour la température de l'air des deux modèles (cf. Figure 4.20), aucun écart n'est notifiable cela est justifiable car les dimensions du grain sont un paramètres limitant dans le calcul de la température de l'air.

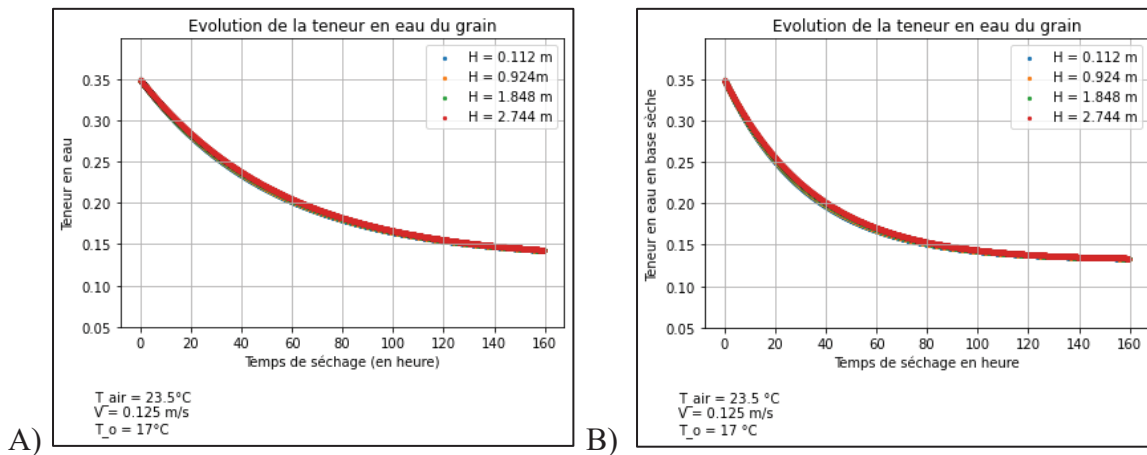


Figure 4.21 Evolution de la teneur en eau en base sèche pour des formes de grain différentes A) modèle sphère, B) modèle parallélépipède

Afin de mieux visualiser les écarts potentiels, j'ai réalisé une corrélation linéaire entre les données de chacune des deux simulations présentées dans la Figure 4.21 pour la variable qui nous intéresse le plus : la teneur en eau des céréales. Tous les coefficients sont très proches de 1, peu importe la hauteur du silo étudiée. Voici les résultats obtenus :

$$R_{0,112\text{m}} = 0,9926 \quad R_{0,924\text{m}} = 0,9927 \quad R_{1,848\text{m}} = 0,9928 \quad R_{2,744\text{m}} = 0,9929$$

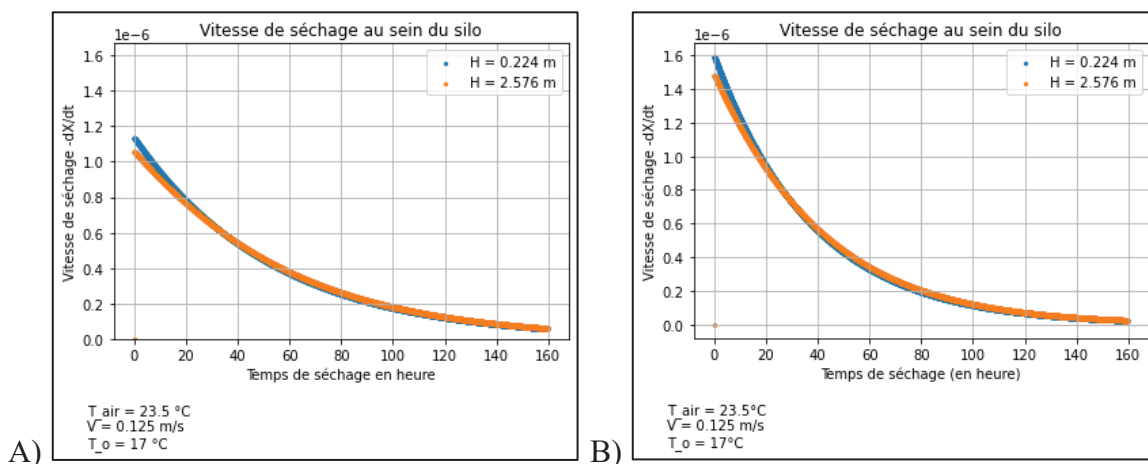


Figure 4.22 Evolution de la vitesse de séchage (s^{-1}) pour des formes de grain différentes A) modèle sphère, B) modèle parallélépipède

Pour le grain en parallélépipède (cf. Figure 4.22 (B)), le taux de séchage est plus élevé au départ, mais chute plus vite et plus fort que pour la modélisation sphérique. Ceci pourrait s'expliquer par la surface d'échange qui est plus grande pour un parallélépipède que pour une sphère.

On peut conclure que les écarts entre le séchage des grains sphériques et parallélépipédiques ne sont pas assez importants pour justifier l'utilisation d'un modèle par rapport à un autre. Pour pousser l'étude on pourrait réaliser le même travail pour plusieurs lots de conditions initiales (intervalles de température différents, vitesse de l'air ventilé, etc.), et observer si les résultats restent inchangés ou pas.

Taille du grain

Pour compléter la première analyse, on s'attarde cette fois-ci sur la taille que l'on considère pour un grain. En optant pour une forme sphérique du grain, on étudie l'impacte de l'augmentation et de la diminution du rayon de la céréale.

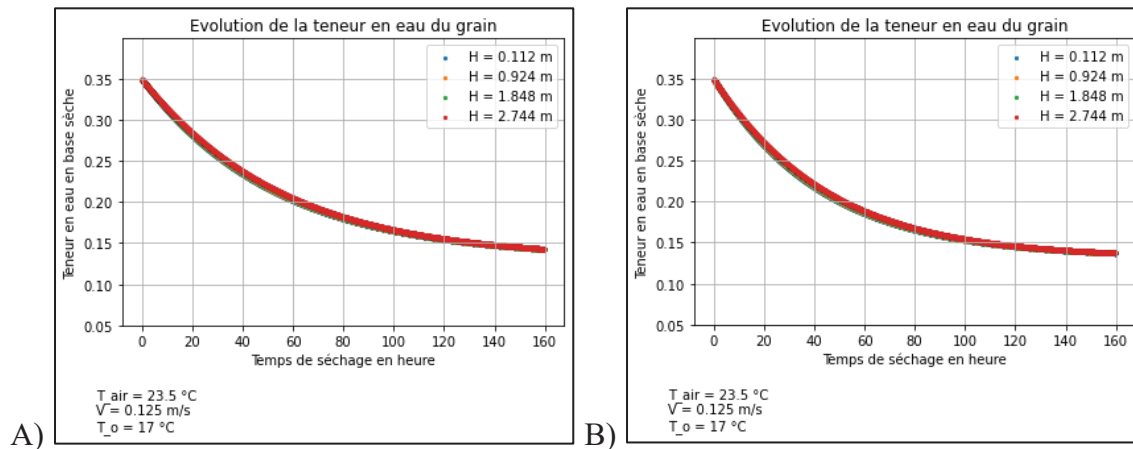


Figure 4.23 Analyse de la diminution de 10% du rayon d'un grain sur sa teneur en eau en base sèche A) Base de comparaison B) Diminution 10%

Afin de voir l'impact sur le temps de séchage de la diminution de la taille des grains de 10 %, on regarde quand est-ce que la teneur en eau du maïs atteint 14 % en base humide. Pour la base comparaison on atteint 14 % au bout de 114,5 h. Pour les céréales plus petites, le temps de séchage pour aboutir à 14 % d'humidité est de 86,4 h. Le temps de séchage est réduit de 24,5 %.

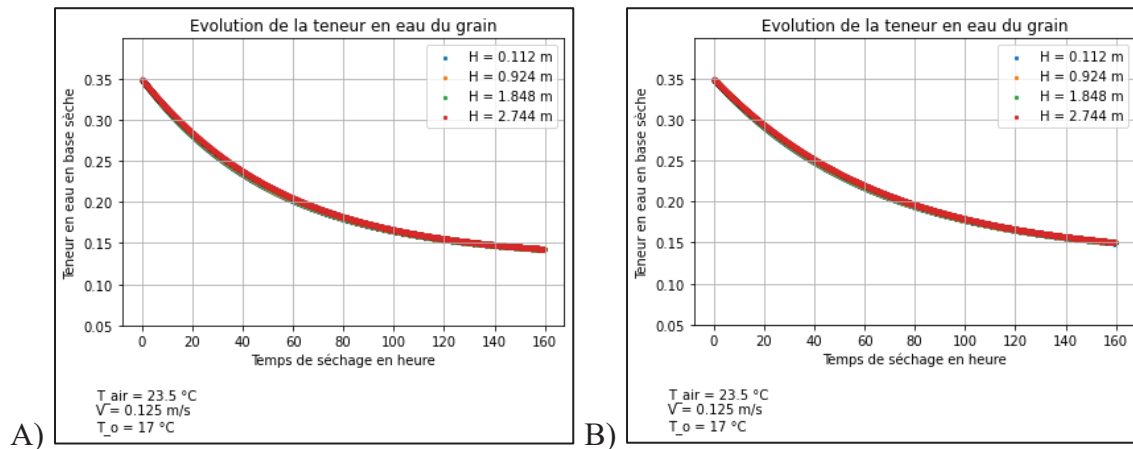


Figure 4.24 Analyse de l'augmentation de 10% du rayon d'un grain sur sa teneur en eau en base sèche A) Base de comparaison B) Augmentation 10 %

Pour évaluer l'impact d'une augmentation de 10 % de la taille des grains sur le temps de séchage, nous avons analysé le moment où la teneur en eau du maïs atteint 14 % en base humide (cf. Figure 4.24). Dans le cas de référence, ce seuil est atteint après 114,5 heures. En revanche,

pour des grains de plus gros rayon, le temps nécessaire pour atteindre 14 % d'humidité est de 127,2 heures. Ce changement entraîne une augmentation du temps de séchage de 11,1 %.

Après cette étude, la taille du grain ressort comme un paramètre déterminant dans le séchage du maïs. Il est important de le définir comme il se doit, notamment en fonction du type de maïs que l'on souhaite sécher.

4.4.4.2 Masse volumique de l'air

Pour simplifier notre outil de simulation, nous analysons les conséquences de la masse volumique de l'air définie comme variable, ou comme une constante. Dans ce dernier cas, nous retenons sa valeur à une température de 20 °C. Les calculs sont effectués pour une température de l'air ventilé de 13,5 °C. L'ensemble des résultats et analyses de cette étude est développé ci-dessous.

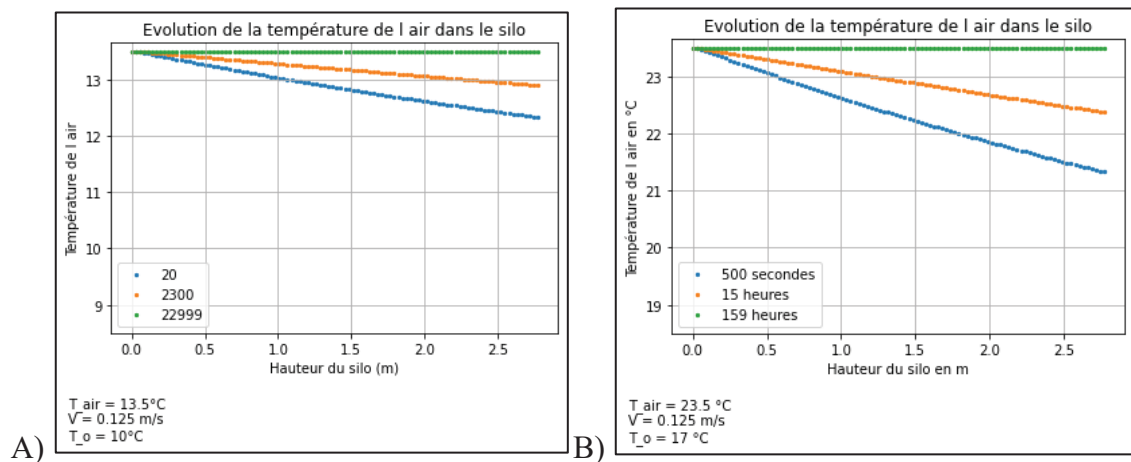


Figure 4.25 Analyse de l'impact de la masse volumique de l'air en la considérant constante ou variable A) $\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$ B) $\rho_{\text{air}} = f(T_{\text{air}}, \text{HR})$

En comparant la température de l'air dans les deux contextes (cf. Figure 4.25), on constate que l'air qui circule dans le silo refroidit légèrement plus vite si la masse volumique est constante.

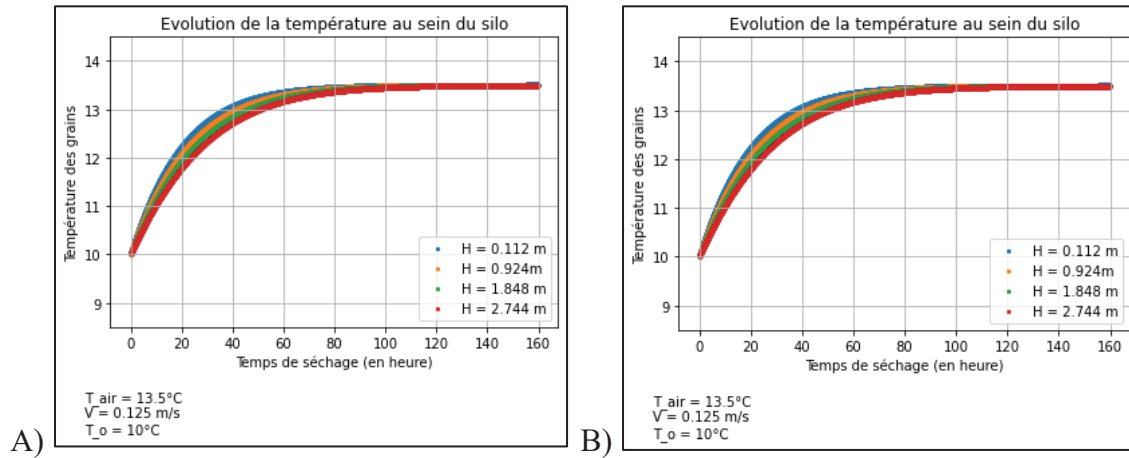


Figure 4.26 Analyse de l'impact de la masse volumique de l'air sur la température des grains
 A) $\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$ B) $\rho_{\text{air}} = f(T_{\text{air}}, \text{HR})$

Aucune différence notable entre les deux graphiques de la Figure 4.26. Ceci est explicable car la masse volumique de l'air n'intervient pas directement dans les équations de résolution de la température des grains.

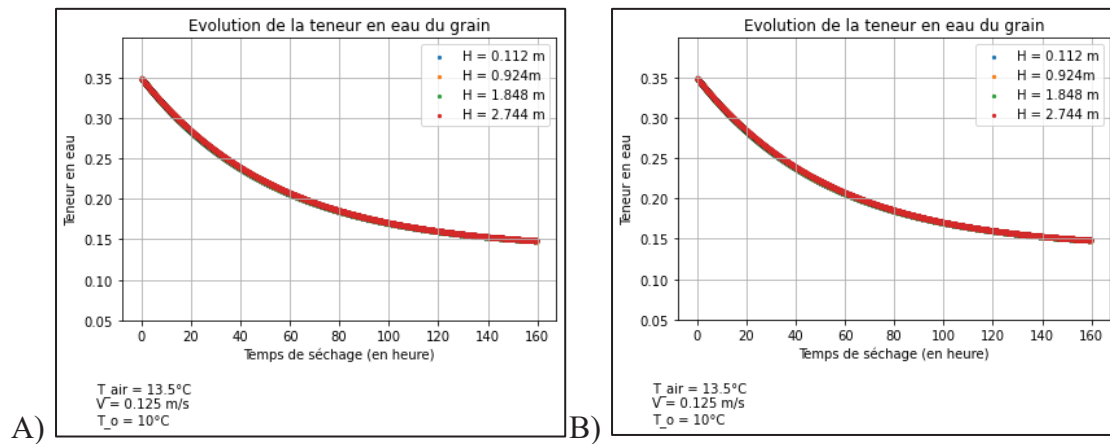


Figure 4.27 Analyse de l'impact de la masse volumique de l'air sur la teneur en eau en base sèche des grains A) $\rho_{\text{air}} = 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$ B) $\rho_{\text{air}} = f(T_{\text{air}}, \text{HR})$

Afin de mieux visualiser les écarts potentiels, j'ai réalisé une corrélation linéaire entre les données de chacune des deux simulations de la Figure 4.27 pour la variable qui nous intéresse le plus : la teneur en eau des céréales. Tous les coefficients sont très proches de 1, peu importe la hauteur du silo étudiée. Voici les résultats obtenus :

$$R_{0,112\text{m}} = 1 \quad R_{0,924\text{m}} = 1 \quad R_{1,848\text{m}} = 0,9999 \quad R_{2,744\text{m}} = 0,9999$$

La masse volumique peut raisonnablement être remplacée par une constante pour diminuer le temps de calcul et la mémoire consommée par l'automate cellulaire lors de son exécution. Pour une étude plus complète de ce paramètre, nous pourrions effectuer plus de calculs pour voir jusqu'à quelle limite de température de l'air, considérer la masse volumique de l'air comme une constante reste valable.

4.4.4.3 Chaleur latente

Afin de réduire la complexité de l'automate cellulaire, on regarde cette fois-ci l'impact de conserver la chaleur de vaporisation de l'eau comme une variable ou une constante. Pour la constante, on choisit sa valeur pour une température de 20°C. Le grain à l'état initial est supposé être à une température de 10°C.

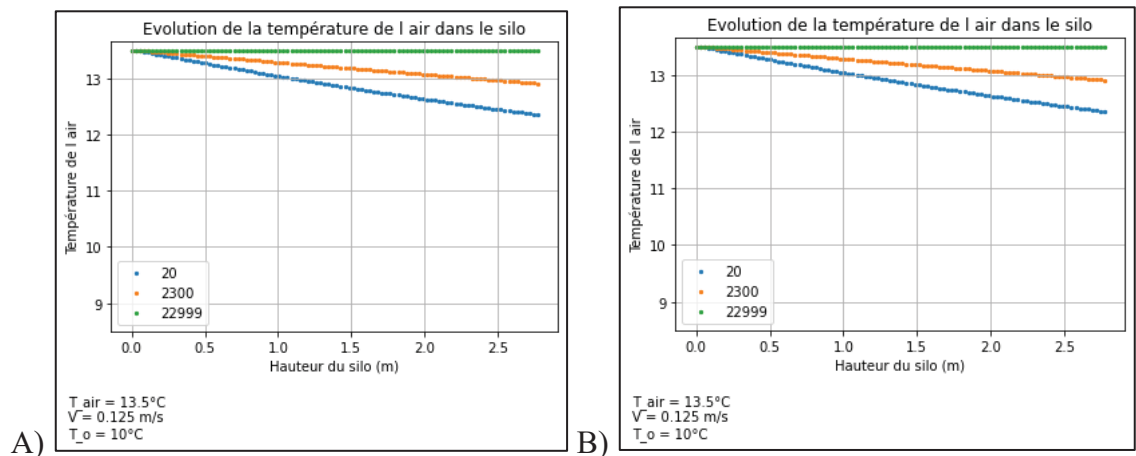


Figure 4.28 Analyse de l'impact de la chaleur latente de vaporisation de l'eau sur la température de l'air A) $h_v = 2454 \text{ kJ.kg}^{-1}$ B) $h_v = f(T_{\text{grain}})$

Aucune différence notable entre ces deux graphiques. Ceci est explicable car la masse volumique de l'air n'intervient pas directement dans les équations de résolution de la température de l'air.

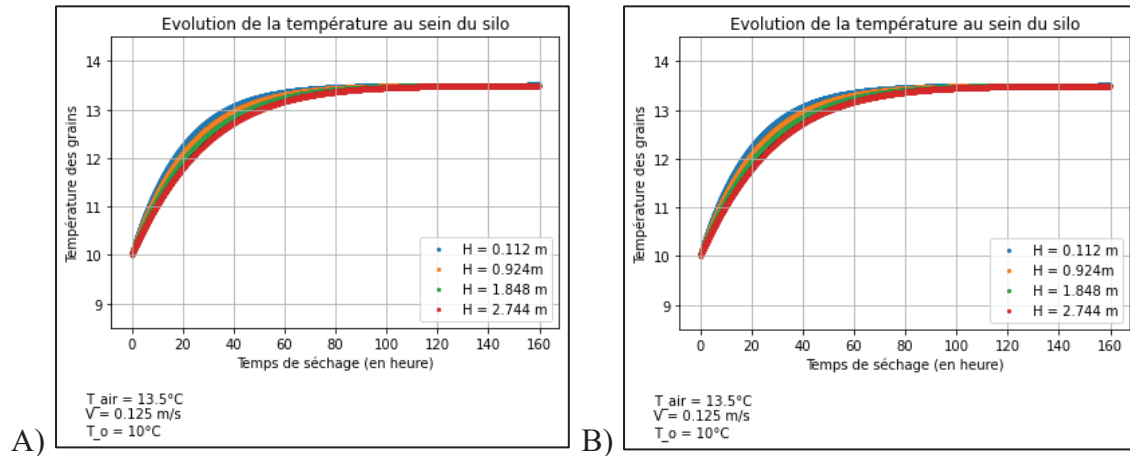


Figure 4.29 Analyse de l'impact de la chaleur latente de vaporisation de l'eau sur la température des grains A) $h_v = 2454 \text{ kJ.kg}^{-1}$ B) $h_v = f(T_{\text{grain}})$

Aucune différence notable entre les deux graphiques. Les coefficients de corrélations linéaires entre ces courbes valent tous 1.

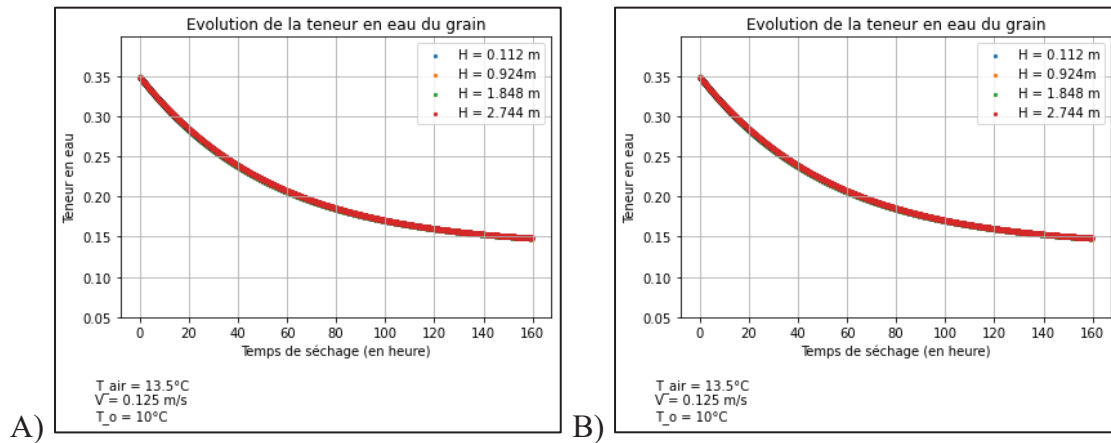


Figure 4.30 Analyse de l'impact de la chaleur latente de vaporisation de l'eau sur la teneur en eau en base sèche des grains A) $h_v = 2454 \text{ kJ.kg}^{-1}$ B) $h_v = f(T_{\text{grain}})$

Afin de mieux visualiser les écarts potentiels, j'ai réalisé une corrélation linéaire entre les données de chacune des deux simulations pour la variable qui nous intéresse le plus : la teneur en eau des céréales. Tous les coefficients sont très proches de 1, peu importe la hauteur du silo étudiée. Voici les résultats obtenus :

$$R_{0,112\text{m}} = 1 \quad R_{0,924\text{m}} = 1 \quad R_{1,848\text{m}} = 1 \quad R_{2,744\text{m}} = 1$$

La chaleur latente de vaporisation de l'eau contenue dans le grain peut définitivement être considérée comme une constante pour notre cas d'étude. Il faudrait mener plusieurs recherches sur d'autres plages de conditions initiales pour savoir si l'on peut faire la même considération plus largement.

4.5 Conclusion

Le chapitre 4 c'est consacré à la création de l'automate cellulaire. Après le choix des paramètres de programmations comme le voisinage, la dimension de l'AC, on a pu intégrer les équations établies dans le chapitre 3. Une analyse des résultats de chacun des modèles : conduction, convection, diffusion d'humidité a ensuite été réalisée.

L'impact de divers paramètres a également été exploré, notamment la taille des grains, leur forme, etc. mettant en évidence leur influence sur la cinétique de séchage. En particulier, il a été observé qu'une réduction de la taille des grains de 10 % permet d'accélérer le séchage de 24,5 %, soulignant ainsi l'importance des caractéristiques physiques du grain dans l'optimisation du processus.

Grâce à ce travail, on a pu réduire la complexité de l'AC en considérant certains paramètres comme constants pour un certain jeu de conditions initiales. Un travail plus approfondi permettrait de pousser ces considérations à une plus grande échelle.

Ces résultats numériques sont prometteurs, mais ce n'est qu'en les comparant à des valeurs réelles de séchage que nous pourrions affirmer leur utilité. Le dernier chapitre se voue à la validation du modèle.

CHAPITRE 5 VALIDATION DU MODELE NUMERIQUE

5.1 Contexte et limites de la validation

Dans l'idéal, la validation du modèle aurait nécessité des données expérimentales sur le séchage du maïs issues de la littérature scientifique. Cependant, malgré des recherches approfondies, ces données ne sont pas disponibles dans les publications accessibles.

Pour pallier cette absence et tester, malgré tout, la robustesse du modèle, nous avons utilisé des données expérimentales de Daniel Turner de 2022 pour le séchage d'une autre céréale : l'orge. Bien que les propriétés thermodynamiques et hygroscopiques de l'orge et du maïs diffèrent, cette approche permet d'évaluer le comportement du modèle face à des conditions initiales et limites réalistes. L'objectif ici n'est pas d'obtenir une validation directe du modèle pour le maïs, mais plutôt de vérifier la cohérence des résultats obtenus avec un jeu de paramètres expérimentaux réels.

5.1.1 Séchage sans arrêt

Lors d'un séchage agricole en silo ventilé, les céréales ne sont en réalité pas séchées en temps continu. Puis que c'est l'air extérieur que l'on utilise, chauffé ou non, pour passer au travers des grains et les sécher on ne peut ventiler un air trop humide. Ainsi sur une période de 14 jours de séchage, on va par exemple sécher 8h par jour sur les blocs d'heures les moins humides, les plus chaudes, afin de s'assurer de ne pas réhumidifier le grain. En effet si l'on continuait de ventiler de l'air extérieur pendant une période humide, et si l'humidité d'équilibre du grain (M_e) devenait supérieure à la teneur actuelle en eau des grains, ceux-là verraient leur humidité augmenter.

Dans la modélisation, on considère au départ qu'on n'arrête pas le ventilateur entre les différents blocs de séchage. Le Tableau 5.1 répertorie les données expérimentales prélevées lors du séchage de l'orge. On va intégrer ces conditions initiales variables dans l'AC qui prend

en compte la diffusion d'humidité (cf. chapitre 4.4) afin d'étudier l'impact sur les résultats. Le maïs au début du séchage est à 20 °C et a une teneur en eau en base humide de 19 %.

Tableau 5.1 Données expérimentales du séchage de l'orge étudiées
Tiré des données expérimentales de Daniel Turner (2022)

Temps (heure)	Température de l'air ventilé (°C)	HR (%)
4,10	24	62,00
5,40	30	48,10
3,00	28	52,80
6,65	29,5	46,50
6,65	28,5	45,50
7,00	16	43,00
4,20	18	40,30
1,00	19	38,20
5,70	13	58,60
4,00	22	59,20

Après avoir exécuté l'AC, on trace différentes courbes pour étudier l'évolution des variables : teneur en eau des grains, température des grains et de l'air (cf. Figure 5.1). Sur le graphique (A) pour l'air, les paliers dus aux différents jeux de conditions initiales sont particulièrement marqués. L'air évolue très rapidement de température entre les différents paliers malgré l'énergie qu'il perd à réchauffer le grain.

Pour commenter l'évolution de la température des grains, il est important de la mettre en parallèle du graphique (A) de la température de l'air. En effet, lorsque l'air augmente en température au début du séchage, la température des grains suit cette évolution avec le bas du silo qui chauffe plus vite que le haut. Cependant, après 32h, l'air à l'entrée se refroidit et les courbes de température des grains sont inversées. La zone du silo la plus chaude se trouve désormais en haut puisqu'elle avait gardé les caractéristiques du bloc de séchage précédent.

Sur le graphe (C), les 4 courbes associés à une hauteur dans le silo, sont très peu espacées. Le phénomène de pallier de séchage n'est pas du tout visible comme on avait pu l'observer dans les chapitres précédents comme sur la figure 4.15. Tous les grains sèchent quasiment à la même

vitesse. Lorsque l'humidité de l'air augmente sur les derniers blocs et que la température de l'air diminue, la pente de séchage diminue alors qu'elle était quasiment constante jusque-là. Ceci est cohérent puisque la capacité d'absorption en eau de l'air est moindre lorsqu'il est plus humide. De plus sur la fin du séchage, il est normal d'observer un ralentissement du décroissement de la teneur en eau des céréales puisque l'eau restante est au cœur du grain et est plus difficile à évaporer (cf. Figure 3.2).

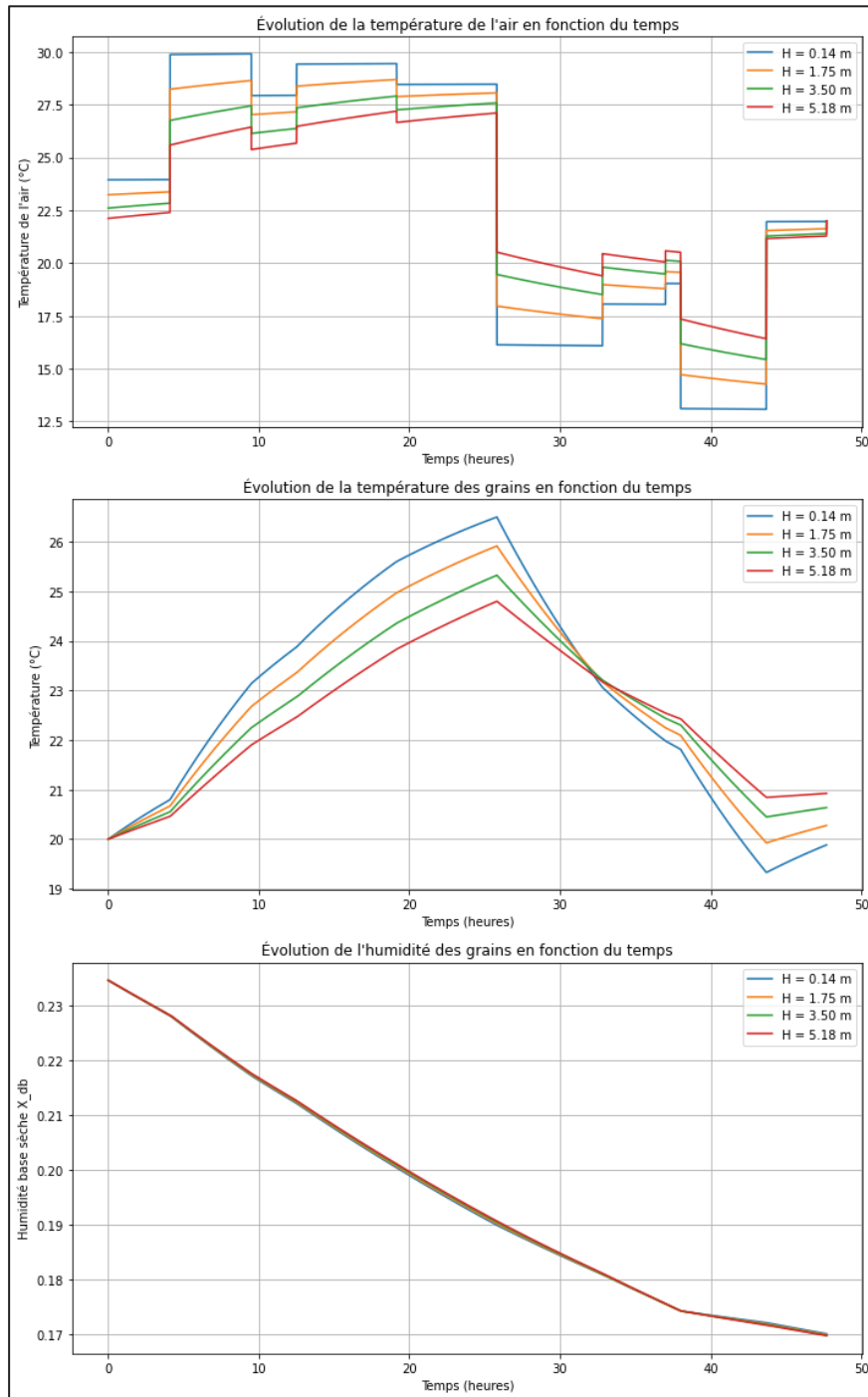


Figure 5.1 Exécution de l'AC de diffusion d'humidité avec pour données d'entrée variables, les données de séchage de l'orge de Daniel Turner (2022) pour étudier un séchage sans arrêt.

A) Température de l'air, B) Température des grains, C) Humidité des grains

5.1.2 Séchage avec arrêt

Lors d'un séchage agricole à air ambiant, on arrête souvent les machines lorsque les conditions météorologiques ne permettent pas de sécher et risque de réhumidifier le grain. Dans les données du Tableau 5.1 un arrêt est normalement prévu après chaque bloc de séchage. On intègre un temps d'arrêt dans le séchage de 6h parmi les données utilisées dans la section précédente (cf. Tableau 5.1). Le but est d'observer l'impact qu'il a sur les différentes variables de séchage sans complexifier inutilement le code en ajoutant de nombreuses pauses.

Tableau 5.2 Données expérimentales du séchage de l'orge avec temps d'arrêt (rouge)
Tiré des données expérimentales de Daniel Turner (2022)

Temps (heure)	Température de l'air ventilé (°C)	HR (%)
4,10	24	62,00
5,40	30	48,10
3,00	28	52,80
6,65	29,5	46,50
6,65	28,5	45,50
6,00	/	/
7,00	16	43,00%
4,20	18	40,30%
1,00	19	38,20%
5,70	13	58,60
4,00	22	59,20

Les mêmes données de séchages ont été utilisées afin de pouvoir mesurer l'impact de la période où l'on coupe le ventilateur (dans la simulation la vitesse de l'air devient nulle : $V = 0 \text{ m.s}^{-1}$). La Figure 5.2 rassemble les résultats obtenus.

Sur le graphique (A), la température de l'air se comporte comme pour un séchage sans arrêt hormis la période où l'air ne circule plus, il stagne dans le silo et prend donc la valeur de la température des grains à sa hauteur.

Concernant le grain (B), sa température durant l'arrêt reste quasiment constante, car il n'y a plus d'apport ni de perte de chaleur. Toutefois, une homogénéisation thermique se produit lentement à travers un unique mécanisme encore actif : la conduction. Cette phase de repos correspond au tempérage, au cours duquel les grains, encore chauds, conservent une certaine inertie thermique. Cette chaleur résiduelle favorise la migration interne de l'humidité vers la surface du grain, même en l'absence de chauffage externe. Autrement dit, l'humidité continue de s'évacuer doucement par effet de diffusion et de capillarité, contribuant ainsi à un meilleur rééquilibrage hydrique du grain. Cette étape est cruciale pour limiter les gradients d'humidité internes et éviter les fissurations. À la fin du séchage, on observe une teneur en eau de 16,5 % en base sèche, contre 17 % pour le procédé sans arrêt, ce qui démontre l'intérêt du tempérage dans l'amélioration de l'efficacité globale du séchage.

Le tempérage est principalement utilisé dans les exploitations agricoles ou industrielles équipées de systèmes de séchage en flux continu ou en plusieurs passes, notamment pour les grandes cultures céréalières comme le maïs, le blé ou le riz. Il est plus courant dans les coopératives, silos collectifs ou exploitations de taille moyenne à grande, où la gestion fine de la qualité du grain est cruciale. Bien que le tempérage n'implique pas de dépense énergétique directe (puisque'il s'agit d'un simple temps de repos), il nécessite souvent des installations adaptées ((Ren et al. 2010), comme des cellules de stockage tampon ventilées ou des séchoirs discontinus bien calibrés. Cela peut représenter un investissement initial, mais l'amélioration du rendement de séchage, la réduction des pertes par fissuration (Prachyawarakorn et al. 2004) et la meilleure conservation des grains justifient son adoption. Il est donc de plus en plus intégré dans les démarches de séchage optimisé, notamment dans un contexte de hausse des coûts énergétiques et de recherche de qualité.

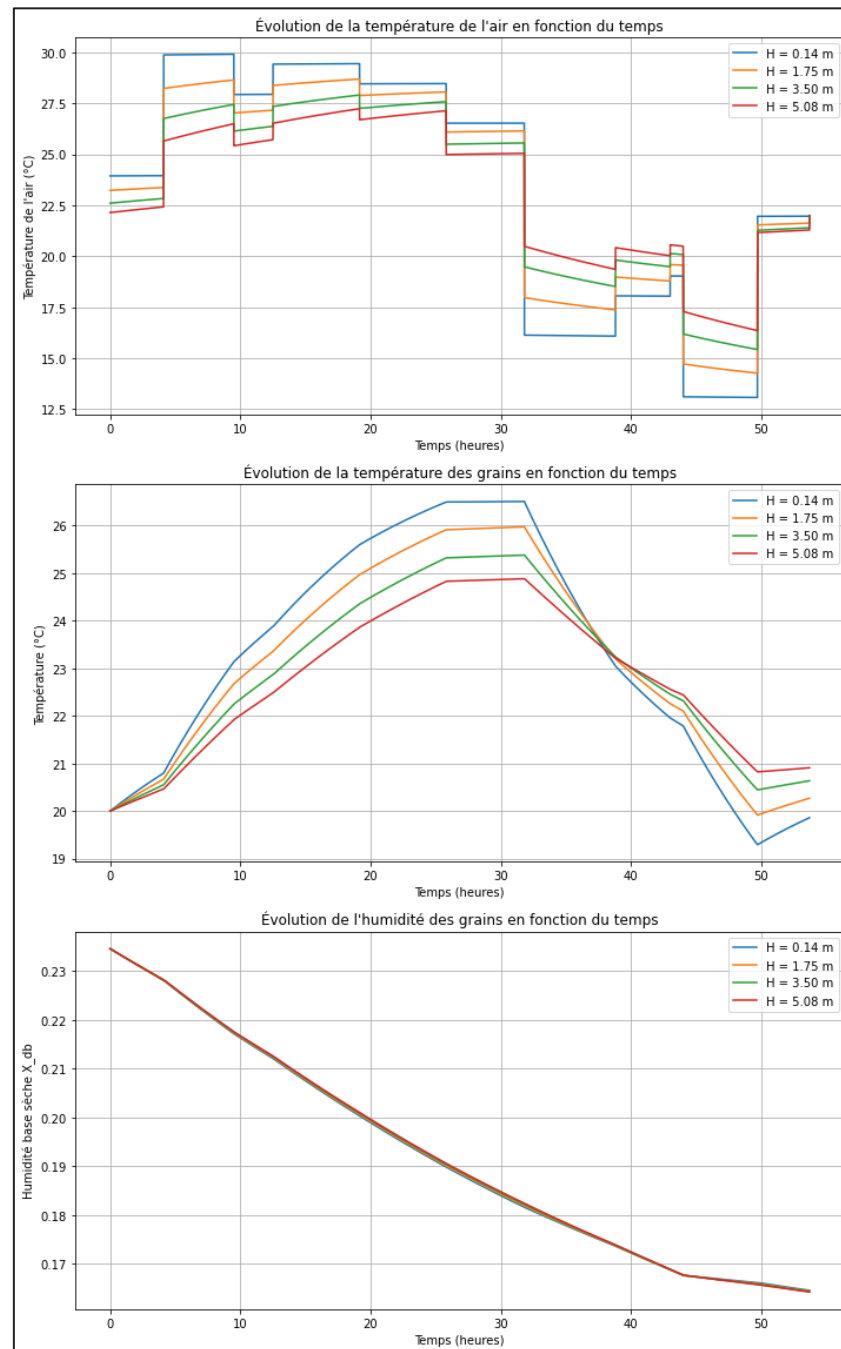


Figure 5.2 Exécution de l'AC de diffusion d'humidité avec pour données d'entrée variables, les données de séchage de l'orge de Daniel Turner (2022) pour étudier un séchage avec un arrêt. A) Température de l'air, B) Température des grains, C) Humidité des grains

5.2 Conclusion

Les résultats obtenus montrent que l'automate cellulaire répond de manière cohérente aux conditions expérimentales utilisées comme données d'entrée. Les évolutions des courbes simulées suivent les tendances attendues, ce qui suggère que le modèle capture correctement les principaux mécanismes du séchage. Toutefois, une validation quantitative précise reste difficile à établir, car l'automate a été conçu pour le maïs, tandis que les données expérimentales utilisées proviennent du séchage de l'orge. Cette différence empêche une comparaison directe des valeurs numériques obtenues avec les mesures expérimentales disponibles.

Pour confirmer la fiabilité du modèle et affiner son paramétrage, une campagne de mesures sur un site de séchage de maïs serait nécessaire. Ces données permettraient d'améliorer la calibration du modèle et d'évaluer plus précisément sa capacité à prédire les dynamiques réelles du séchage en silo ventilé.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce travail de recherche s'est inscrit dans une démarche d'optimisation du séchage du maïs, un enjeu crucial pour l'industrie agroalimentaire en raison de son impact sur la conservation des grains, la réduction des pertes et la maîtrise des coûts énergétiques. L'objectif principal a été de développer une approche de modélisation basée sur un automate cellulaire afin de simuler les transferts de chaleur et d'humidité à l'échelle silo.

Dans un premier temps, une analyse approfondie de l'état de l'art a permis de mettre en évidence les différentes méthodes existantes pour la modélisation du séchage des grains. Les approches analytiques, bien que rapides, présentent des limites en raison de leurs hypothèses simplificatrices, tandis que les simulations numériques de type éléments finis ou CFD, plus précises, restent coûteuses en calcul et difficiles à appliquer à grande échelle. L'automate cellulaire s'est alors présenté comme une alternative pertinente, offrant un compromis entre précision et efficacité computationnelle, grâce à sa capacité à représenter des phénomènes complexes avec des règles locales simples.

Les équations régissant les phénomènes physiques qui ont lieu pendant le séchage, tels que la conduction, la convection et la diffusion de l'humidité, ont été identifiées et formalisées. Ce cadre a servi de fondement à la construction du modèle numérique développé. À travers plusieurs études paramétriques, notamment sur la taille des grains, l'humidité initiale ou la température de l'air, il a été démontré que l'automate permet de capturer avec réalisme les effets de ces paramètres sur la dynamique de séchage.

Le modèle développé a été testé avec des données expérimentales de séchage de l'orge, faute de disposer de données spécifiques au maïs dans la littérature. Bien que ces deux céréales présentent des différences en termes de structure et de propriétés hygroscopiques, l'utilisation de l'orge a permis d'évaluer la cohérence du modèle dans des conditions de séchage réalistes. Les résultats obtenus ont montré une bonne adéquation des tendances simulées avec les observations expérimentales, validant ainsi le fonctionnement global du modèle. Cependant,

l'absence de données spécifiques au maïs empêche une validation complète et appelle à des investigations expérimentales futures.

Une autre voie d'amélioration du modèle réside dans l'augmentation de la complexité de l'automate cellulaire, afin de mieux représenter la diversité des conditions de séchage rencontrées en milieu industriel. Par exemple, il serait intéressant d'intégrer des paramètres supplémentaires comme le taux de poussière dans le grain, qui peut influencer la circulation de l'air et les échanges thermiques, ou encore la forme de l'amas de grains dans le silo, qui joue un rôle clé dans la répartition des flux de chaleur et d'humidité. Il faudrait alors étudier une nouvelle façon de paramétrer les cellules de grains afin d'intégrer ces données et variables.

Le travail a aussi permis de mettre en évidence le phénomène de tempérage lors de la simulation d'un séchage comprenant des arrêts. L'automate cellulaire pourrait permettre d'explorer ce processus qui reste encore peu utilisé par les exploitants agricoles.

En conclusion, ce travail constitue une première étape vers une modélisation plus efficace du séchage du maïs. En dépit de l'absence de données expérimentales spécifiques, les résultats obtenus démontrent le potentiel des automates cellulaires pour cette application. La poursuite des recherches dans cette direction pourra contribuer à une meilleure maîtrise des procédés de séchage, avec des bénéfices tant économiques qu'environnementaux pour l'industrie céréalière.

BIBLIOGRAPHIE

- Alix Violet, Eddy El-Tabach, Mame William-Louis. 2022. Automates cellulaires pour la modélisation des transferts thermiques au sein de matériaux hétérogènes. Congrès National de la Recherche des IUT (CNR-IUT), Roanne, France. fahal-03820696v1.
- André Charreau, Roland Cavaillé. 1997. Séchage, Théorie et calculs.
- ADEME, SOLAGRO, CTIFL, ASTREDHOR, ARVALIS, FNCUMA, IDELE, IFIP, ITAVI. 2018. Agriculture et efficacité énergétique : propositions et recommandations pour améliorer l'efficacité énergétique de l'agriculture des exploitations agricoles en France.
- Abibi. 2013. Modélisation et simulation d'incendie de forêt par automate cellulaire. Rev. Mar. Sci. Agron. Vét. 2 :73-84.
- Bachir Boumaiza. 2013. Modélisation sous COMSOL Multiphysics d'un système de séchage. Université du 8 mai 1945 – Guelma.
- Christian Couturier et Sylvain Doublet. 2022. Le maïs, repères sur sa production et ses usages, et pistes pour limiter la vulnérabilité aux risques d'approvisionnements, Solagro.
- Daniel Turner. 2022. Données expérimentales de séchage prélevées sur la récolte de l'orge en 2022.
- Dyck. 2017. Réduction de l'énergie consommée par les séchoirs à grain, fiche technique 17-002 AGDEX.
- Dyck. 2020. Séchage des grains à l'air ambiant, fiche technique 20-044 AGDEX.
- Emmanuel Baidhe, Clairmont L. Clementson. 2024. A review of the application of modeling and simulation to drying systems for improved grain and seed quality. Department of Agricultural and Biosystems Engineering, North Dakota State University.

- Fournier, Y. Maurissen, I. Harouna. 1994. Séchage statique des céréales à basse température. Utilisation de toitures solaires pour séchoir à maïs. *Journal de Physique III*, 4 (3), pp.543-556.
- Guangyue Ren, Ledao Zhang, Fanlian Zeng, Yebei Li, Linlin Li, Xu Duan. Effects of hot air-drying temperature and tempering time on the properties of maize starch. *Int J Agric & Biol Eng*, 2020; 13(6): 236–241.
- Henderson, S.M. and Pabis, S. 1961. Grain Drying Theory I. Temperature Effects on Drying Coefficient. *Journal of Agricultural Engineering Research*.
- Jérôme Damelincourt. Caractéristiques techniques des automates cellulaires, 2003. <<http://www.futura-sciences.com/tech/dossiers/robotique-automates-cellulaires-285>> consulté le 11 février 2025.
- Matthieu Schubnel. Sécher le maïs en cribs pour augmenter la marge. *Matériel Agricole Info*. <<http://www.materielagricole.info/decouvertes/article/728841/sechage-alternatif-stocker-en-cribs-pour-augmenter-la-marge>> consulté le 10 février 2025.
- Nileshwari Raju Yewle et al. Food. 2023. Short-Term Hermetic Storage of Wet Maize and Its Effect on Quality.
- Raziye Ince, Emin Güzel, Ahmet Ince. 2008. Thermal Properties of Some Oily Seeds, *Journal of Agricultural Machinery Science*, 4 (4), p399-405.
- Sébastien Tordeux et Victor Péron. 2021. Analyse numérique : La méthode des différences finies.
- Simon Marié. 2010. Notions de Thermodynamiques et Transferts Thermiques. CNES, Cours MECAVENIR.
- Somkiat Prachayawarakorn, Somchart Soponronnarit, Somboon Wetchacama, Kongsak Chinnabun, Methodology for enhancing drying rate and improving maize quality in a

fluidised-bed dryer, Journal of Stored Products Research, Volume 40, Issue 4, 2004, pages 379-393.

Stanislaw Pabis, Digvir S. Jayas, Stefan Cenkowski. 1998. Grain Drying, Theory and Practice.

Traore. 2018. Modélisation cellulaire et simulation physique : contribution à l'analyse de la dynamique de population des insectes ravageurs. Université de Bretagne occidentale, Brest.