

Modélisation De La Cinétique De Séchage Du Papayer Et Analyse Multivariée De L'Influence Des Prétraitements

RAHOLIMANANTSOA Fenitra Nomena.^{1,1}, RAKOTOSON Tolontsoa.^{1,2}, RAJOELISON Andrianarimalala Abel.^{1,3}, RANDRIANJA Roger^{1,4}.

^{11,1,2, 1,4} Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université Antananarivo

¹³ Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université Antananarivo

Auteur Correspondant : RAHOLIMANANTSOA Fenitra Nomena



Résumé : Cette étude porte sur la modélisation de la cinétique de séchage du papayer et l'analyse multivariée de l'influence des prétraitements sur les paramètres agronomiques et physiologiques, dans un contexte de valorisation post-récolte dans la région d'Itasy. Plusieurs modèles classiques de cinétique de séchage (Newton, Page, Henderson, Midilli et TwoTerm) ont été ajustés aux données expérimentales du ratio de masse. Les résultats montrent une variabilité interindividuelle marquée, avec une meilleure performance globale des modèles multi-termes, en particulier le modèle TwoTerm, soulignant la complexité des mécanismes de transfert d'humidité dans le fruit. L'analyse en composantes principales révèle une structuration multidimensionnelle des données, où les prétraitements n'induisent pas une séparation nette mais influencent certaines tendances physiologiques et productives. L'interpolation bidimensionnelle met en évidence une interaction non linéaire entre la température interne et la vitesse interne, identifiant des zones favorables à un séchage efficace. Enfin, le clustering K-means projeté sur le plan PCA confirme l'existence de profils distincts de comportement agronomique et physiologique. Ces résultats démontrent l'intérêt d'une approche intégrée combinant modélisation et analyses multivariées pour l'optimisation du séchage du papayer.

Mots-clés : Papayer, cinétique de séchage, modélisation, analyse multivariée, ACP, K-means

Abstract: This study focuses on the modeling of papaya drying kinetics and on a multivariate analysis of the influence of pretreatments on agronomic and physiological parameters, within a post-harvest valorization context in the Itasy region. Several classical drying kinetics models (Newton, Page, Henderson, Midilli, and TwoTerm) were fitted to experimental mass ratio data. The results reveal marked inter-individual variability, with an overall better performance of multi-term models, particularly the TwoTerm model, highlighting the complexity of moisture transfer mechanisms within the fruit. Principal component analysis reveals a multidimensional structure of the data, in which pretreatments do not induce a clear separation of individuals but influence certain physiological and productive trends. Two-dimensional interpolation highlights a nonlinear interaction between internal temperature and internal velocity, identifying conditions favorable for efficient drying. Finally, K-means clustering projected onto the PCA plane confirms the existence of distinct agronomic and physiological behavior profiles. These results demonstrate the relevance of an integrated approach combining modeling and multivariate analyses for optimizing papaya drying processes.

Keywords: Papaya, drying kinetics, modeling, multivariate analysis, PCA, K-means.

INTRODUCTION

Le papayer (*Carica papaya* L.) est une culture fruitière largement répandue dans les régions tropicales et subtropicales, appréciée pour sa richesse nutritionnelle, notamment en vitamines, minéraux et composés bioactifs, ainsi que pour son intérêt économique croissant [1]. Cependant, la forte teneur en eau du fruit le rend particulièrement périssable, entraînant d'importantes pertes post-récolte, en particulier dans les zones où les infrastructures de conservation et de transformation restent limitées [2]. Dans ce contexte, le séchage constitue une technologie de conservation efficace permettant de réduire l'activité de l'eau, d'allonger la durée de conservation et de faciliter la valorisation des fruits sous des formes transformées [3]. La description du comportement de séchage des produits agricoles repose généralement sur la modélisation de la cinétique de perte d'humidité à l'aide de modèles mathématiques empiriques ou semi-empiriques. Des modèles tels que ceux de Newton, Page, Henderson, Midilli et TwoTerm sont largement utilisés pour représenter l'évolution du ratio de masse ou du ratio d'humidité en fonction du temps [4]. Néanmoins, la pertinence de ces modèles dépend étroitement de la structure interne du matériau biologique, de sa composition, ainsi que des conditions opératoires du séchage, ce qui justifie la nécessité d'évaluations comparatives spécifiques à chaque produit [5]. Par ailleurs, les prétraitements appliqués avant le séchage peuvent modifier de manière significative les propriétés physiques, agronomiques et physiologiques des fruits, influençant les mécanismes internes de transfert de chaleur et de masse, ainsi que la qualité finale du produit séché [6]. L'analyse de ces effets requiert une approche globale capable de prendre en compte simultanément un grand nombre de variables corrélées, ce que permettent les méthodes d'analyse statistique multivariée telles que l'analyse en composantes principales et les techniques de classification non supervisée [7]. Dans ce cadre, la présente étude a pour objectif de modéliser la cinétique de séchage du papayer à partir de différents modèles mathématiques et d'analyser, à l'aide d'outils multivariés, l'influence des prétraitements sur les paramètres agronomiques et physiologiques. Cette approche intégrée vise à améliorer la compréhension des mécanismes de séchage du papayer et à contribuer à l'optimisation des stratégies de transformation post-récolte, notamment dans la région d'Itasy.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

1-Zone d'étude

L'étude a été conduite dans la région d'Itasy, située dans les Hautes Terres centrales de Madagascar. Cette région est caractérisée par un climat tropical d'altitude, avec des températures modérées, une saison sèche bien marquée et une saison humide favorable au développement des cultures fruitières. Le papayer (*Carica papaya* L.) y est largement cultivé, tant pour l'autoconsommation que pour la commercialisation locale, ce qui en fait une zone pertinente pour l'étude des procédés de conservation et de valorisation post-récolte.

2-Matériau végétal et prétraitements

Les fruits de papayer utilisés dans cette étude ont été récoltés à maturité physiologique auprès de producteurs locaux de la région d'Itasy. Après récolte, les fruits ont été triés afin d'éliminer ceux présentant des défauts visibles, puis lavés et préparés selon les protocoles expérimentaux. Deux types de prétraitements ont été appliqués avant le séchage (PTA et PTT), afin d'évaluer leur influence sur les paramètres agronomiques, physiologiques et sur la cinétique de séchage. Les caractéristiques initiales, notamment la masse, l'humidité initiale et certains paramètres internes, ont été mesurées avant le début du séchage.

3-Procédure de séchage et collecte des données

Le séchage a été réalisé dans des conditions contrôlées, avec un suivi temporel du ratio de masse afin de caractériser la perte d'eau au cours du temps. Des mesures de température interne et de vitesse interne ont été enregistrées afin de mieux

comprendre les mécanismes de transfert de chaleur et de masse. Les données expérimentales ont servi de base à l'ajustement des modèles de cinétique de séchage et aux analyses statistiques ultérieures.

4-Modélisation de la cinétique de séchage

Les données de ratio de masse ont été ajustées à plusieurs modèles classiques de cinétique de séchage, à savoir les modèles de Newton, Page, Henderson, Midilli et TwoTerm. L'ajustement des paramètres a été réalisé par régression non linéaire, et la performance des modèles a été évaluée à l'aide de critères statistiques tels que l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Cette approche permet d'identifier le modèle le plus adapté pour décrire la dynamique de séchage du papayer.

5-Analyses statistiques multivariées

L'analyse en composantes principales (ACP) a été utilisée pour explorer la structure multidimensionnelle des variables agronomiques et physiologiques et pour identifier les principaux gradients de variation. Une matrice de corrélation de Pearson a permis d'analyser les relations entre les variables mesurées. En complément, un clustering non supervisé par l'algorithme de K-means a été appliqué afin d'identifier des groupes homogènes d'individus présentant des profils agronomiques et physiologiques distincts. Les résultats du clustering ont été projetés sur le plan factoriel de l'ACP pour faciliter leur interprétation.

6-Outils informatiques et bibliothèques Python

L'ensemble des analyses a été réalisé à l'aide du langage de programmation Python. Les bibliothèques NumPy et Pandas ont été utilisées pour la manipulation et le traitement des données numériques [8,9]. Les ajustements de modèles et les interpolations ont été effectués à l'aide de SciPy [10]. Les analyses multivariées, incluant l'ACP et le clustering K-means, ont été réalisées avec scikit-learn [11]. Les visualisations graphiques ont été produites à l'aide de Matplotlib et Seaborn, permettant une représentation claire des résultats et des structures statistiques identifiées [12,13]. L'ensemble de ces outils offre un environnement robuste et reproductible pour l'analyse des données expérimentales agricoles [14].

RESULTATS ET DISCUSSIONS

1-Comparaison des modèles de cinétique de séchage appliqués au papayer : ajustement du ratio de masse au cours du temps

La figure suivante présente l'ajustement de plusieurs modèles classiques de cinétique de séchage aux données expérimentales de ratio de masse mesurées sur quatre fruits distincts de papayer. Chaque sous-figure correspond à un individu (E001 à E004) et compare la courbe observée au comportement simulé par cinq modèles couramment utilisés dans l'analyse du séchage : Newton, Page, Henderson, Midilli et TwoTerm. Le meilleur modèle pour chaque fruit est indiqué selon le critère de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), permettant d'évaluer la fidélité de l'ajustement entre valeurs observées et prédictions théoriques. Cette visualisation permet de mettre en évidence la capacité variable de chaque modèle à représenter les dynamiques de perte de masse en fonction des caractéristiques propres à chaque fruit.

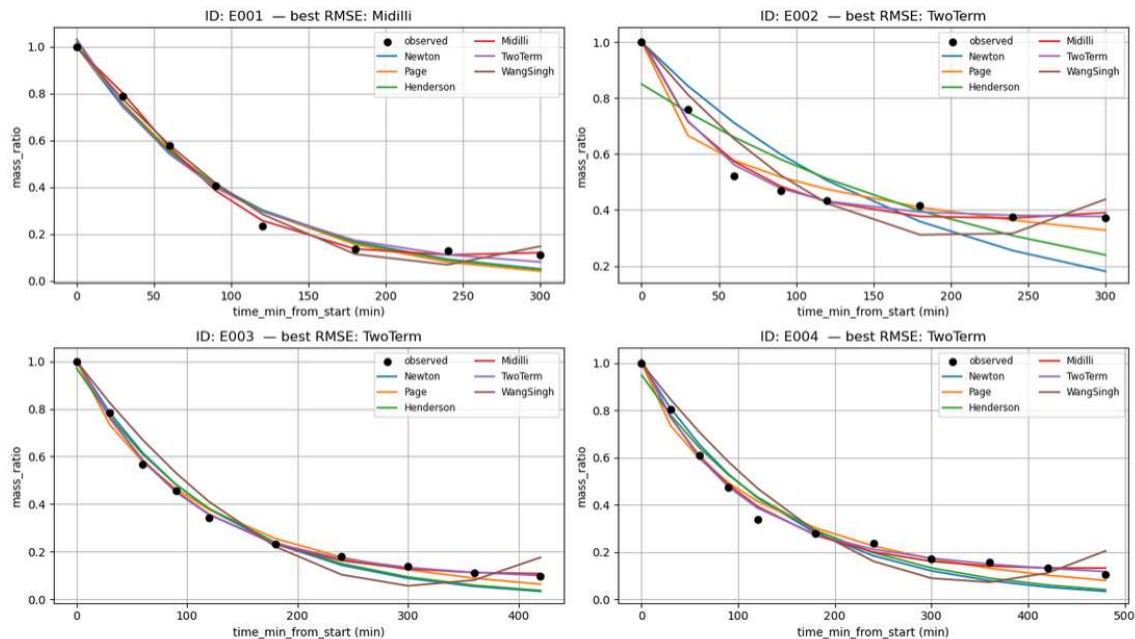


Figure 1: Comparaison des modèles de cinétique de séchage appliqués au papayer : ajustement du ratio de masse au cours du temps

Interprétation

L'observation des quatre sous-figures révèle une cohérence générale dans la diminution du ratio de masse au cours du temps, illustrant la dynamique attendue du séchage progressif. Toutefois, les modèles diffèrent par leur précision d'ajustement selon les profils individuels des fruits. Pour l'individu E001, le modèle de Midilli fournit le meilleur ajustement, comme en témoigne sa proximité constante avec les données observées et sa capacité à reproduire fidèlement la courbure initiale ainsi que la phase de décélération du séchage. À l'inverse, pour les fruits E002, E003 et E004, le modèle TwoTerm apparaît systématiquement comme celui offrant la meilleure performance, ce qui indique que la dynamique de séchage de ces individus nécessite la prise en compte de deux termes exponentiels pour refléter la complexité de leurs transferts internes d'humidité. La superposition des courbes montre que certains modèles, comme Newton ou Henderson, tendent à simplifier la cinétique en produisant des courbes plus régulières et parfois trop abruptes par rapport aux observations réelles, surtout lors des phases intermédiaires où la vitesse de séchage diminue. Les modèles Page et Midilli, qui incorporent des paramètres supplémentaires, captent mieux cette non-linéarité, mais leur performance varie selon les fruits, suggérant une influence non négligeable des caractéristiques spécifiques de chaque échantillon, comme l'épaisseur, la structure interne ou la teneur initiale en eau. Le modèle TwoTerm se distingue par sa flexibilité, particulièrement visible pour les individus E002 à E004, où il suit de près l'allure observée, y compris dans les phases tardives où les processus de diffusion interne deviennent prédominants. La comparaison globale souligne que la cinétique de séchage du papayer n'est pas uniforme entre les individus, et que l'adéquation du modèle dépend des caractéristiques intrinsèques du fruit. Cette variabilité illustre bien l'importance d'un choix adapté de modèle lorsque l'objectif est de décrire précisément les mécanismes de perte d'eau dans le cadre de la modélisation des systèmes agricoles et de la transformation post-récolte. Les résultats mettent en évidence la pertinence des modèles multi-termes pour des matériaux biologiques présentant une structure interne complexe, comme c'est le cas du papayer étudié dans la région d'Itasy.

2-Analyse en composantes principales (ACP) des paramètres agronomiques du papayer selon le type de prétraitement

La figure ci-dessous présente le biplot issu de l'analyse en composantes principales réalisée à partir des variables agronomiques et physiologiques mesurées sur les plants de papayer. Les individus sont colorés en fonction du prétraitement appliqué, permettant de visualiser la façon dont les paramètres étudiés contribuent à différencier les réponses des plants soumis aux deux types de prétraitement PTA et PTT. Cette représentation graphique offre une vision synthétique de la structure multidimensionnelle du jeu de données et met en évidence les associations entre les variables ainsi que la distribution des observations dans l'espace factoriel.

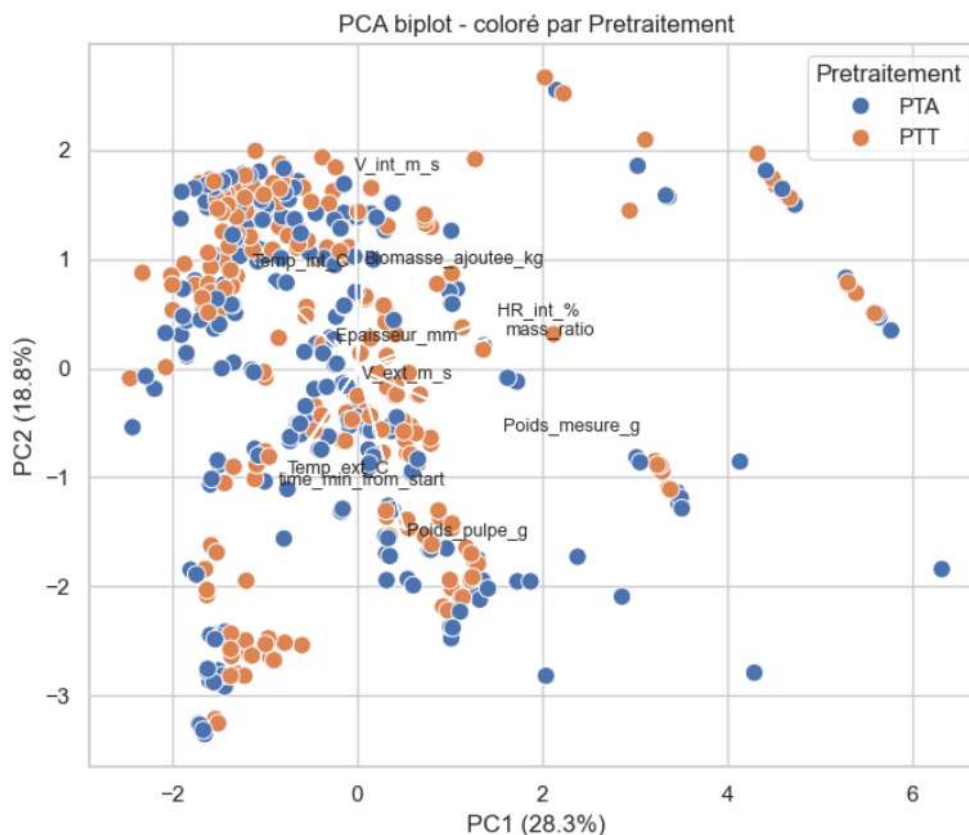


Figure 2: Analyse en composantes principales (ACP) des paramètres agronomiques du papayer selon le type de prétraitement

Interprétation

L'analyse du premier plan factoriel, cumulant 28,3 % de la variance pour l'axe PC1 et 18,8 % pour PC2, révèle une organisation relativement diffuse des observations, témoignant d'une variabilité importante au sein des plants, quelles que soient les modalités de prétraitement. Bien que les points représentant PTA et PTT présentent un recouvrement notable, certaines zones du graphique suggèrent des différenciations partielles entre les deux groupes. Les observations situées vers les valeurs élevées de PC1 sont davantage associées à des variables telles que le poids mesuré ou le poids de pulpe, ce qui indique que cet axe exprime

principalement un gradient lié à la productivité ou à la biomasse. À l'inverse, les valeurs négatives de PC1 rassemblent des variables plus directement reliées aux mesures internes de vitesse, de température ou d'humidité, traduisant un axe davantage orienté vers les réponses physiologiques. L'axe PC2 met en évidence des variations associées à des paramètres thermiques et hydriques, notamment la température interne et l'humidité relative interne, ce qui reflète des différences dans la dynamique de fonctionnement des fruits. La dispersion des individus en hauteur suggère que ces variables contribuent à une différenciation secondaire mais significative des plants. Les flèches représentant les variables se projettent de manière cohérente avec leur contribution, indiquant quels paramètres influencent le plus la position des observations dans l'espace PCA. Dans l'ensemble, la figure illustre que les prétraitements n'induisent pas une séparation franche des individus, mais influencent néanmoins certaines tendances physiologiques et agronomiques. L'approche multidimensionnelle met en évidence la complexité des interactions entre les facteurs de prétraitement et la performance des plants de papayer, tout en soulignant l'importance de combiner des indicateurs productifs et physiologiques pour caractériser de manière robuste les systèmes agricoles étudiés dans la région d'Itasy.

3-Analyse des relations entre variables agronomiques et physiologiques : matrice de corrélation de Pearson

La figure ci-dessous représente la matrice de corrélation de Pearson calculée à partir des principales variables agronomiques, physiologiques et biophysiques mesurées sur le papayer. Cette représentation permet de mettre en évidence la force et la direction des relations linéaires entre les différents paramètres étudiés. Le code couleur indique les corrélations positives ou négatives ainsi que leur intensité, offrant ainsi une lecture intuitive des interactions structurelles qui organisent le comportement des fruits dans le contexte des systèmes agricoles de la région d'Itasy.

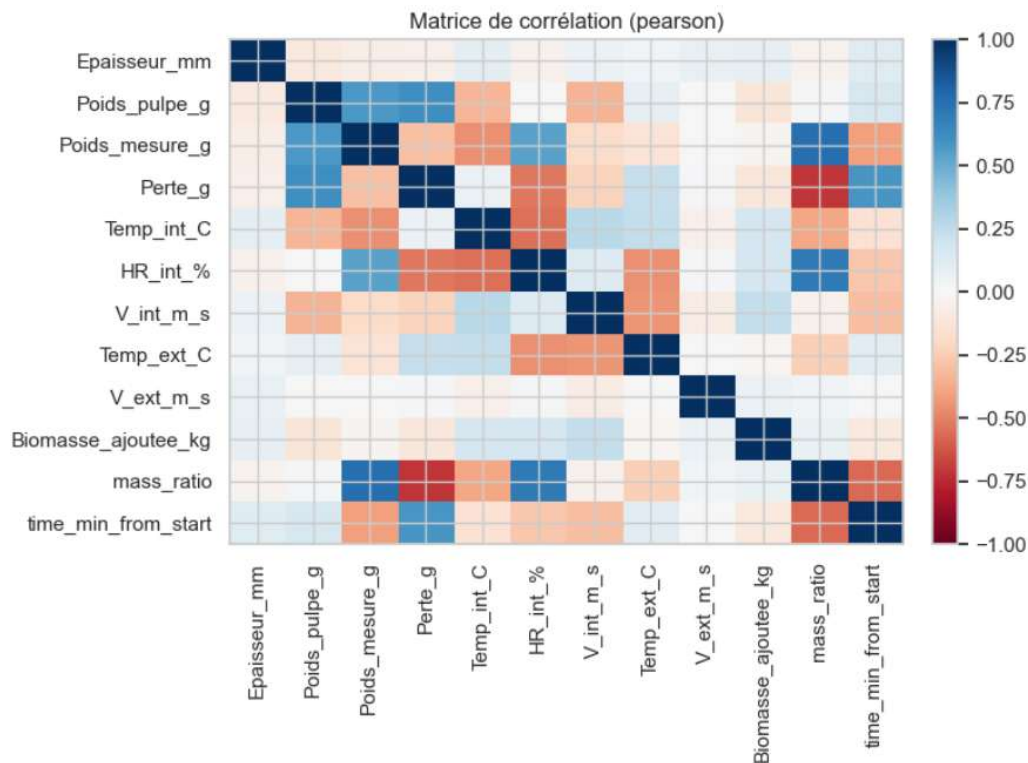


Figure 3: Analyse des relations entre variables agronomiques et physiologiques : matrice de corrélation de Pearson

Interprétation

L'examen de la matrice révèle des associations marquées entre plusieurs variables clés, témoignant de l'existence de mécanismes physiologiques et agronomiques cohérents. Les variables liées aux dimensions biométriques et aux mesures de poids, telles que l'épaisseur, le poids de pulpe et le poids total, présentent des corrélations fortement positives entre elles, indiquant qu'elles évoluent conjointement et traduisent un même gradient de croissance ou de développement des fruits. De même, le ratio de masse montre des liens positifs avec ces variables, suggérant qu'il constitue un indicateur pertinent de la productivité et de l'accumulation de biomasse. À l'inverse, certaines variables physiologiques internes, notamment la perte de masse ou l'humidité relative interne, présentent des corrélations négatives avec des indicateurs de poids ou d'épaisseur, traduisant une relation inverse entre la déshydratation ou la dynamique interne des fruits et leur développement biométrique. Les variables thermiques et de vitesse interne ou externe montrent quant à elles des relations plus contrastées, reflétant des mécanismes plus complexes où les conditions thermiques influencent différemment la structure et la réponse hydrique des fruits. La variable relative au temps écoulé depuis le début de la mesure présente des corrélations négatives marquées avec le ratio de masse et certaines dimensions biométriques, suggérant une diminution progressive de certains paramètres au fil du temps, possiblement liée à des processus de maturation, de respiration ou de perte hydrique. Les corrélations positives entre la biomasse ajoutée et certains paramètres internes indiquent enfin un lien entre la dynamique de croissance et l'activité physiologique du fruit. Dans l'ensemble, cette matrice met en évidence que les paramètres mesurés ne sont pas indépendants mais structurés autour de grands axes physiologiques et agronomiques cohérents, confirmant la pertinence d'une approche multidimensionnelle pour comprendre la performance et les trajectoires de développement du papayer. Ces relations contribuent à éclairer les mécanismes sous-jacents qui conditionnent la durabilité et l'efficacité des systèmes agricoles étudiés dans la région d'Itasy.

4-Interpolation 2D du ratio de masse en fonction de la température interne et de la vitesse interne du papayer

La figure ci-après présente une interpolation bidimensionnelle du ratio de masse en fonction de la température interne ($Temp_int_C$) et de la vitesse interne ($V_int_m_s$) des fruits de papayer. Cette carte de contours permet de visualiser la manière dont ces deux variables physiologiques interagissent pour influencer l'état final de rétention d'eau, représenté par le ratio de masse. Les points noirs correspondent aux observations expérimentales réelles et servent de repères pour évaluer la cohérence et la distribution du modèle d'interpolation.

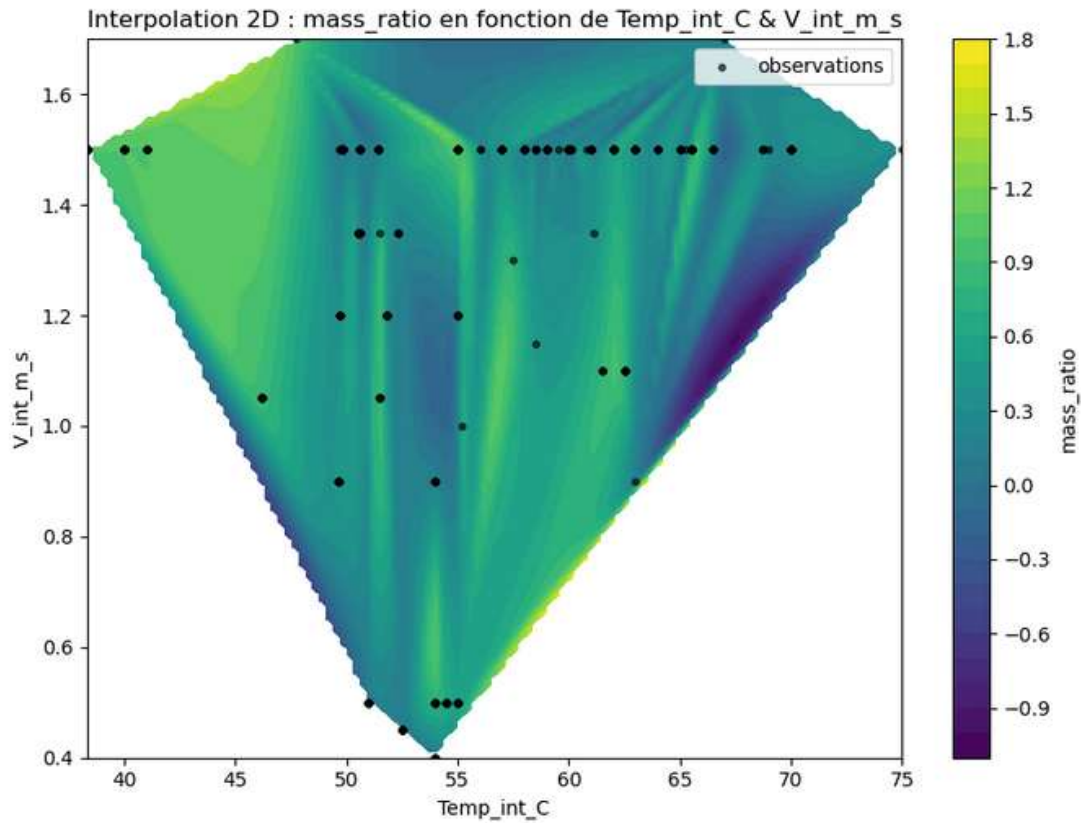


Figure 4: Interpolation 2D du ratio de masse en fonction de la température interne et de la vitesse interne du papayer

Interprétation

La carte d'interpolation met en évidence une structure complexe du ratio de masse dans l'espace défini par la température interne et la vitesse interne. Les zones de couleur plus sombre indiquent les régions où le ratio de masse est plus faible, signifiant une perte d'eau plus importante et donc un séchage plus efficace. Ces zones se situent principalement autour de températures comprises entre 60 °C et 70 °C et pour des vitesses internes intermédiaires, ce qui suggère que ce domaine combine des conditions favorables à une évaporation accrue et à une diffusion interne efficace de l'humidité. À l'inverse, les zones de couleur plus claire, correspondant à des ratios de masse plus élevés, apparaissent davantage aux extrémités de la plage thermique ou pour des vitesses très faibles ou très élevées. Ces configurations semblent moins propices au séchage, soit en raison d'une énergie thermique insuffisante pour accélérer la diffusion de l'eau, soit parce que des vitesses internes trop importantes pourraient indiquer une dynamique physiologique particulière limitant l'efficacité du processus. La transition graduelle des couleurs suggère une interaction non linéaire entre température et vitesse, reflétant la complexité du comportement physio-thermique du fruit. La distribution des observations expérimentales (points noirs) montre qu'elles se situent majoritairement dans la zone centrale de l'espace exploré, renforçant la pertinence de l'interpolation dans cette région. Quelques observations périphériques s'écartent toutefois du gradient principal, ce qui traduit des comportements individuels atypiques ou des mesures prises dans des conditions moins fréquentes. Le contraste entre ces observations et l'interpolation révèle également que certaines zones extrêmes de l'espace paramétrique sont peu couvertes expérimentalement, ce qui pourrait influencer la précision locale du modèle.

Dans l'ensemble, cette visualisation démontre que la combinaison de la température interne et de la vitesse interne constitue un déterminant majeur du ratio de masse final, confirmant l'importance d'une approche multivariée pour comprendre les mécanismes de séchage ou de perte d'humidité dans les fruits de papayer. Ces résultats contribuent à renforcer la modélisation des systèmes agricoles et à identifier des zones optimales de fonctionnement dans la perspective d'une valorisation durable de la production dans la région d'Itasy.

5-Structure des groupes issus du clustering K-means projetée sur le plan PCA

La figure suivante illustre la projection des individus dans l'espace défini par les deux premières composantes principales, tout en affichant la partition obtenue par l'algorithme de K-means avec trois clusters. Cette représentation permet d'évaluer la cohérence interne des groupes identifiés et leur correspondance éventuelle avec les gradients structurels mis en évidence par l'analyse en composantes principales. L'objectif est ainsi de visualiser la manière dont les individus se répartissent dans ce plan multidimensionnel réduit et de déterminer si les clusters reflètent des profils distincts en termes de caractéristiques agronomiques et physiologiques des plants de papayer.



Figure 5: Structure des groupes issus du clustering K-means projetée sur le plan PCA

Interprétation

La projection montre une segmentation nette des individus en trois ensembles relativement bien différenciés dans le plan formé par PC1 et PC2. Le premier cluster, représenté en bleu, se concentre principalement dans les zones négatives de PC2, traduisant un groupe caractérisé par des valeurs plus faibles de certains paramètres liés à la dynamique interne et à la productivité. Le second cluster, figuré en orange, occupe majoritairement les zones positives de PC2 et se répartit autour de valeurs négatives de PC1, suggérant des profils plus homogènes en termes de réponses physiologiques, notamment sur le plan thermique et hydrique, qui semblent structurer fortement ce groupe. Le troisième cluster, représenté en vert, se distingue clairement par des positions très positives sur PC1 et plus dispersées sur PC2, indiquant un groupe d'individus dont les caractéristiques sont marquées par des valeurs élevées de variables associées à la masse, au poids ou à d'autres indicateurs agronomiques liés à la performance productive. La cohérence spatiale de ces clusters suggère que l'algorithme de K-means a capté des structurations internes réelles dans les données, reflétant l'existence de profils contrastés au sein des plants étudiés. La distance entre le cluster vert et les deux autres témoigne d'une différenciation marquée, probablement associée à des conditions de développement spécifiques ou à des réponses physiologiques distinctes. Les clusters bleu et orange, bien que voisins, se séparent nettement selon un gradient vertical qui correspond à la seconde composante principale, ce qui confirme l'importance des variables physiologiques internes dans la structuration des individus. Dans l'ensemble, cette représentation conjointe de la PCA et du clustering met en évidence la pertinence d'une approche multidimensionnelle pour caractériser la diversité des comportements agronomiques du papayer dans la région d'Itasy. Elle souligne que les groupes obtenus ne sont pas arbitraires mais s'appuient sur des motifs réels de variation, révélant ainsi la complexité et la richesse des dynamiques associées aux systèmes agricoles étudiés.

DISCUSSION

Les résultats de cette étude mettent en évidence la complexité de la cinétique de séchage du papayer et confirment que les modèles empiriques classiques ne présentent pas tous la même capacité à décrire fidèlement la dynamique de perte de masse. La supériorité observée des modèles multi-termes, notamment le modèle TwoTerm, pour plusieurs individus, est en accord avec des travaux antérieurs montrant que ces modèles sont mieux adaptés aux matériaux biologiques à structure interne hétérogène [15]. Cette performance suggère que le séchage du papayer est gouverné par des mécanismes combinés de transfert superficiel et de diffusion interne, particulièrement marqués aux phases intermédiaires et finales du séchage. La variabilité interindividuelle observée dans l'ajustement des modèles souligne l'influence des caractéristiques propres aux fruits, telles que la teneur initiale en eau, l'épaisseur de la pulpe ou la porosité interne. Des études similaires ont rapporté que ces facteurs peuvent fortement moduler la cinétique de séchage et expliquer les différences de performance entre modèles pour un même type de produit agricole [16]. Ces résultats confirment l'intérêt d'une approche individualisée ou segmentée dans la modélisation des processus post-récolte.

L'analyse multivariée a permis de compléter l'approche cinétique en apportant une lecture intégrée des paramètres agronomiques et physiologiques. L'ACP a révélé que les prétraitements n'induisent pas une séparation nette des individus, mais modulent certains gradients physiologiques et productifs, traduisant des effets subtils mais significatifs. Cette absence de séparation franche est cohérente avec des travaux antérieurs montrant que les réponses des fruits aux prétraitements sont souvent continues plutôt que discrètes [17]. Le clustering K-means, projeté sur le plan PCA, a toutefois permis d'identifier des profils distincts, confirmant l'existence de comportements différenciés au sein des plants étudiés. Enfin, l'interpolation bidimensionnelle du ratio de masse en fonction de la température interne et de la vitesse interne met en évidence une interaction non linéaire entre ces variables, suggérant l'existence de domaines optimaux de fonctionnement pour le séchage. Ces résultats renforcent l'intérêt d'approches multivariées couplées à la modélisation pour identifier des conditions opératoires favorables à l'optimisation des procédés de séchage du papayer. Dans l'ensemble, cette étude démontre que la combinaison de modèles cinétiques et d'analyses statistiques avancées constitue un outil pertinent pour améliorer la compréhension et la maîtrise des processus de transformation post-récolte dans les systèmes agricoles tropicaux, notamment dans la région d'Itasy.

CONCLUSION

La présente étude a permis de mettre en évidence la complexité de la cinétique de séchage du papayer et l'importance d'une approche intégrée pour en décrire les mécanismes. La comparaison de plusieurs modèles mathématiques a montré que les modèles multi-termes, en particulier le modèle TwoTerm, offrent une meilleure capacité à représenter la dynamique de perte de masse, bien que des variations interindividuelles significatives aient été observées. Ces résultats soulignent que le comportement de séchage du papayer dépend fortement des caractéristiques intrinsèques des fruits, ce qui justifie un choix adapté du modèle en fonction du matériau étudié. L'analyse multivariée a apporté une compréhension complémentaire en mettant en évidence des tendances physiologiques et agronomiques influencées par les prétraitements, sans toutefois induire une séparation nette des individus. La combinaison de l'analyse en composantes principales, des corrélations et du clustering a permis d'identifier des profils distincts de comportement, révélant la diversité des réponses des fruits aux conditions de séchage.

Par ailleurs, l'interpolation bidimensionnelle a confirmé le rôle déterminant de l'interaction entre la température interne et la vitesse interne dans la maîtrise du ratio de masse final. Dans l'ensemble, cette étude démontre que l'association de la modélisation cinétique et des analyses statistiques avancées constitue un outil pertinent pour l'optimisation des procédés de séchage du papayer et contribue à la valorisation durable des productions fruitières dans la région d'Itasy.

REFERENCE

- [1] Islam, M. Z., Das, S., Monalisa, K., & Sayem, A. S. M. (2019). Influence of Osmotic Dehydration on Mass Transfer Kinetics and Quality Retention of Ripe Papaya (*Carica papaya* L.) during Drying. *AgriEngineering*, 1(2), 220–234. <https://doi.org/10.3390/agriengineering1020016>
- [2] El-Aouar, A. A., Azoubel, P. M., & Murr, F. E. X. (2003). Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya (*Carica papaya* L.). *Journal of Food Engineering*, 59, 85–91.
- [3] Manzoor, S. (Year unknown). Thin-layer drying characteristics of papaya (*Carica papaya*). (Application of kinetic models including Two-Term, Page, Henderson).
- [4] Khodabakhsh Aghdam, S., Yousefi, A. R., Mohebbi, M., & Razavi, S. M. A. (2015). Modeling for drying kinetics of papaya fruit using fuzzy logic. *International Food Research Journal*, 22(3), 1234–1239.
- [5] Ferreira, J. P. L., et al. (2020). Convective drying kinetics of osmotically pretreated papaya cubes and model fitting of drying curves. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*.
- [6] Yap, J. Y. (Year unknown). Effects of drying conditions on drying kinetics, product quality and retention of active compounds in papaya leaves. (Investigation of transport properties relevant to drying modeling).
- [7] Ocoro-Zamora, M. U. (2013). Influence of sample thickness on drying kinetics, water activity and color of papaya. (Study on thin sample effects in drying behaviour).
- [8] Harris, C. R., et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585, 357–362.
- [9] McKinney, W. (2010). Data Structures for Statistical Computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, 51–56.
- [10] Virtanen, P., et al. (2020). SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261–272.
- [11] Pedregosa, F., et al. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- [12] Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95.

- [13] Waskom, M. L. (2021). Seaborn: Statistical Data Visualization. *Journal of Open Source Software*, 6(60), 3021.
- [14] VanderPlas, J. (2016). *Python Data Science Handbook*. O'Reilly Media.
- [15] Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503–1513.
- [16] Doymaz, İ. (2011). Drying of green apple slices: effect of slice thickness on drying kinetics and rehydration characteristics. *Food and Bioproducts Processing*, 89(4), 343–351.
- [17] Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 374, 20150202.