

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE SALAH BOUBNIDER CONSTANTINE 3**



**FACULTE DE GENIE DES PROCÉDES**

**DEPARTEMENT DE GENIE CHIMIQUE**

N° d'ordre :.....

Série :.....

**Mémoire de Master**

**Filière : Génie des procédés**

**Spécialité : Génie chimique**

**THEME**

**MODELISATION DE LA CINETIQUE DE SECHAGE DES  
TROIS LEGUMES (CAROTTE, COURGETTE ET POIVRON  
VERT) PAR LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS  
(RNA)**

Dirigé par:

**Mr. A. BENKORICHI**

Grade: MAA

Présenté par :

- **BOUCHAIR Ahmed**

- **BERKAL Ibrahim**

- **CHENIB Abdelhak**

Année Universitaire 2018/2019.

Session : juillet

**TABLE DES MATIERES**

<b>TABLE DES MATIERES</b>	<b>i</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b>	<b>vi</b>
<b>NOTATION</b>	<b>vii</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>

**CHAPITRE I**

**GENERALITE SUR LE SECHAGE**

I.1	Introduction .....	2
I.2	Définition.....	2
I.3	Domaines d'utilisation.....	2
I.3.1	Industrie agroalimentaire .....	3
I.4	Principes physiques du séchage.....	4
I.4.1	Séchage par ébullition.....	4
I.4.2	Séchage par entraînement .....	4
I.5	Grandeurs caractéristiques.....	4
I.5.1	Grandeurs relatives à l'air humide .....	5
I.5.1.1	Humidité absolue « teneur en humidité ».....	5
I.5.1.2	Degré de saturation « Pourcentage en humidité » .....	5
I.5.1.3	Humidité relative .....	5
I.5.1.4	Température sèche « Température de bulbe sec ».....	6
I.5.1.5	Température humide « Température de bulbe humide ».....	6
I.5.1.6	Point de rosée « $T_r$ » .....	6
I.5.1.7	Diagrammes de l'air humide .....	6
I.5.2	Grandeurs relatives au solide humide .....	7
I.5.2.1	Description du solide humide .....	7
I.5.2.2	Humidité absolue «teneur en eau».....	7
I.5.2.3	Humidité relative .....	7

I.5.2.4	Activité de l'eau.....	8
I.5.2.5	Isothermes de sorption.....	9
I.5.2.6	Hygroscopicité.....	9
I.5.2.7	Comportement du solide humide dans l'air.....	9
I.6	Modes de séchage.....	11
I.6.1	Séchage direct ou par convection.....	11
I.6.2	Séchage indirect ou par conduction.....	11
I.6.3	Séchage par rayonnement.....	12
I.7	Cinétique de séchage.....	12
I.7.1	Différentes phases du séchage.....	14
I.7.1.1	Phase 0 : Période de mise en température.....	14
I.7.1.2	Phase I : Période à vitesse de séchage constante.....	15
I.7.1.3	Phase II: Période à vitesse de séchage décroissante.....	15
I.7.2	Modélisation des cinétiques de séchage.....	16
I.8	Conclusion.....	18
<b>CHAPITRE II</b>		
<b>RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS</b>		
II.1	Introduction.....	19
II.2	Historique des RNA.....	19
II.3	Définition.....	21
II.4	Notions de base sur les réseaux de neurones artificiels.....	21
II.4.1	Neurone biologique.....	21
II.4.2	Neurone artificiel.....	22
II.4.2.1	Fonction d'activation.....	24
II.5	Architecture des réseaux de neurones artificiels.....	26
II.5.1	Réseaux de neurones non bouclés « feedforward networks ».....	26
II.5.1.1	Réseaux de neurones à couches.....	27
a)	Réseaux de neurones multicouches classiques.....	27

b) Réseaux de neurones à connexions locales.....	28
II.5.2 Réseaux de neurones bouclés « récurrent networks ».....	28
II.6 Apprentissage des réseaux de neurones artificiels .....	29
II.6.1 Types d'apprentissage.....	30
II.6.1.1 Apprentissage supervisé .....	30
II.6.1.2 Apprentissage non supervisé .....	31
II.6.2 Algorithme d'apprentissage .....	31
II.6.2.1 Algorithme de rétropropagation du gradient de l'erreur .....	31
II.7 Conclusion .....	34
<b>CHAPITRE III</b>	
<b>MODELISATION DE LA CINETIQUE DE SECHAGE PAR RNA</b>	
III.1 Introduction .....	35
III.2 Méthodologie de travail.....	35
III.2.1 Elaboration la structure du réseau de neurones artificiels.....	36
III.2.2 Critères d'évaluation de performance du modèle neuronal .....	37
III.2.2.1 Critère graphique .....	37
III.2.2.2 Critères statistiques .....	37
III.3 Résultats et discussion .....	38
III.3.1 Cinétique de séchage.....	38
III.3.2 Modélisation par réseau de neurones artificiel.....	40
a) Cas de carotte.....	40
b) Cas de courgette.....	44
c) Cas de poivron vert.....	48
III.3.3 Comparaison entre modèle RNA et Henderson et Pabis.....	52
III.4 Conclusion .....	54
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>55</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>57</b>

## المخلص

الهدف من هذا العمل هو نمذجة حركيات التجفيف لثلاث خضر: الجزر و الكوسة والفلفل الأخضر بواسطة نموذج بيولوجي (الشبكة العصبية الاصطناعية). النموذج المستعمل من نوع RNA-PMC والبنيات العصبية المثالية هي [1-3-1]- [1-8-1] و [1-5-1] للجزر والكوسة والفلفل الأخضر على التوالي. نتائج محاكاة حركيات التجفيف للخضروات المتحصل عليها عن طريق الشبكة العصبية الاصطناعية مرضية و جد مقبولة . بأعلى معامل ارتباط R محصور بين (0.9999 و 0.99998) وأقل خطأ تربيعي MSE محصور بين ( $3.9626 \times 10^{-5}$  و  $9.696 \times 10^{-4}$ ). مقارنة النماذج ذات البنيات المثالية RNA-PMC للخضروات الثلاثة مع نموذج آخر شبه تجريبي (نموذج هندرسون و بابيس) أعطت نتائج أفضل في حالة الخضروات الثلاثة.

**الكلمات المفتاحية :** التجفيف، النمذجة، الشبكة العصبية الاصطناعية، حركيات التجفيف.

## Abstract

The aim of this work is to model the drying kinetics of three vegetables: carrot, zucchini and green pepper by a biological model (artificial neural network). The model used is RNA-PMC type and an optimal neural architecture is [1-3-1], [1-8-1] and [1-5-1] for carrot, zucchini and green pepper respectively. The results of simulation of the drying kinetics of these vegetables obtained by Artificial Neural Network are satisfactory and acceptable. The highest correlation coefficient R was between (0.99997; 0.99998) and the lowest mean squared error (MSE) was between ( $3.9626 \times 10^{-5}$ ;  $9.696 \times 10^{-4}$ ).

The comparison of RNA model for the three vegetables with other semi-empirical model (Henderson and Pabis model) has given good result for the three vegetables.

**Key Words:** Drying, Modeling, Artificial Neural Network, Drying kinetics.

## Résumé

Le but de ce travail est de modéliser les cinétiques de séchage de trois légumes : carotte, courgette et poivron vert par un modèle biologique : le réseau de neurone artificiel. Le modèle utilisé était de type RNA-PMC et l'architecture neuronale optimale est [1-3-1], [1-8-1] et [1-5-1] pour la carotte, courgette et le poivron vert respectivement. Les résultats de simulation de la cinétique de séchage des légumes obtenus par Réseau de Neurone Artificiel sont satisfaisants et acceptables. Le coefficient de corrélation R est plus élevée et était entre (0.99997 et 0.99998) et l'erreur quadratique moyenne (MSE) était plus faible entre et était ( $3.9626 \times 10^{-5}$  et  $9.696 \times 10^{-4}$ ).

La comparaison du model RNA pour les trois légumes avec d'autre model semi-empirique (model d'Henderson et Pabis) qu'à donné de bon résultat dans les trois légumes.

**Mots clés :** Séchage, Modélisation, Réseau de Neurones Artificiels, Cinétique de séchage.