

# Amélioration de la qualité de la tomate séchée par microondes assistés par air chaud avec pilotage de la puissance spécifique

Kisselmina Kone

▶ **To cite this version:**

Kisselmina Kone. Amélioration de la qualité de la tomate séchée par microondes assistés par air chaud avec pilotage de la puissance spécifique. Economies et finances. AgroParisTech; Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (Yamoussoukro, Côte d'Ivoire), 2011. Français. NNT : 2011AGPT0058 . pastel-00771870

**HAL Id: pastel-00771870**
**https://pastel.hal.science/pastel-00771870**

Submitted on 9 Jan 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

AgroParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

Ecole Doctorale ABIES
Agriculture Agriculture Alimentation Food Biologie Biology Environnement Environment Santé Health

# Doctorat ParisTech

## T H È S E

**pour obtenir le grade de docteur délivré par**

## L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement

## (AgroParisTech)

### Spécialité : Sciences et procédés des aliments

*présentée et soutenue publiquement par*

**Kisselmina Youssouf KONE**

le 13 décembre 2011

# Amélioration de la qualité de la tomate séchée par microondes assistés par air chaud avec pilotage de la puissance spécifique

Directeur de thèse : **Albert DUQUENOY**
Encadrement de la thèse : **Jean-Claude LAGUERRE**

**Jury**

| | |
|---|---|
| **M. Michel DELMOTTE**, Professeur, UMR 8006, Arts et Métiers ParisTech | Président |
| **M. André LEBERT**, Professeur, Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand | Rapporteur |
| **M. Jean-Pierre PAIN**, Professeur, Responsable Département STIA, Polytech Montpellier | Rapporteur |
| **M. Alain SOMMIER**, Ingénieur de recherche, Laboratoire Trefle UMR 8508 | Membre |
| **M. Jean-Claude LAGUERRE**, Docteur, UMR 1145, Institut Polytechnique Lasalle-Beauvais | Examinateur |
| **M. Albert DUQUENOY**, Professeur, UMR 1145, AgroParisTech Massy | Examinateur |

**AgroParisTech**
**Institut Polytechnique Lasalle-Beauvais**
60026 Rue Pierre Waguet Beauvais

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

AgroParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

Ecole Doctorale ABIES
Agriculture
Agriculture
Alimentation
Food
Biologie
Biology
Environnement
Environment
Santé
Health

# Doctorat ParisTech

# T H È S E

**pour obtenir le grade de docteur délivré par**

## L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement

## (AgroParisTech)

### Spécialité : Sciences et procédés des aliments

*présentée et soutenue publiquement par*

**Kisselmina Youssouf KONE**

le 13 décembre 2011

# Amélioration de la qualité de la tomate séchée par microondes assistés par air chaud avec pilotage de la puissance spécifique

Directeur de thèse : **Albert DUQUENOY**
Encadrement de la thèse : **Jean-Claude LAGUERRE**

**Jury**

| | |
|---|---|
| **M. Michel DELMOTTE**, Professeur, UMR 8006, Arts et Métiers ParisTech | Président |
| **M. André LEBERT**, Professeur, Polytech, Clermont-Ferrand | Rapporteur |
| **M. Jean-Pierre PAIN**, Professeur, Responsable Département STIA, Polytech Montpellier | Rapporteur |
| **M. Alain SOMMIER**, Ingénieur de recherche, Laboratoire Trefle UMR 8508 | Membre |
| **M. Jean-Claude LAGUERRE**, Docteur, UMR 1145, Institut Polytechnique Lasalle-Beauvais | Examinateur |
| **M. Albert DUQUENOY**, Professeur, UMR 1145, AgroParisTech Massy | Examinateur |

**Institut Polytechnique Lasalle-Beauvais**
60026 Rue Pierre Waguet Beauvais

*A feu mon père,*

*A ma mère, à mes frères et sœurs, à mon épouse et mes enfants qui ont su supporter ces longs moments d'attente dans l'espoir de mon retour au pays.*

## AVANT PROPOS & REMERCIEMENTS

Ce document a été réalisé dans le cadre de ma thèse effectuée à l'Ecole Doctorale ABIES d'AgroParisTech. Le travail qui a pour thème "*Amélioration de la qualité de la tomate séchée par microondes assistés par air chaud avec pilotage de la puissance spécifique*", est le couronnement de quatre années d'études réalisées en alternance entre le Département de Formation et de Recherche en Génie Chimique et Agroalimentaire (DFR - GCAA) de l'Institut National Polytechnique Houphouët Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro en Côte d'Ivoire et le Département des Sciences et Techniques Agro-industrielles (STAI) de l'Institut Polytechnique Lasalle Beauvais en France.

L'aboutissement de cette thèse n'a été possible qu'avec la contribution de certaines personnes que je tiens à remercier et à qui j'exprime ma profonde gratitude; il s'agit de :

- M. Albert DUQUENOY mon Directeur de thèse pour avoir accepté de diriger patiemment cette thèse et pour sa disponibilité et son soutien pendant la rédaction;
- M. Jean Claude LAGUERRE mon encadreur de thèse en France, pour ses critiques, conseils et sa disponibilité à mon endroit;
- M. Michel DELMOTTE, pour avoir accepté de participer à mon comité de thèse et aussi pour ces conseils avisés en matière de microondes et surtout pour avoir mis à ma disposition des wattmètres et des coupleurs directifs pour la réalisation de ce travail;
- M. Cyril DRUON, pour avoir conçu tout le programme de pilotage du séchage microondes sous le logiciel LabView® et donc rendu possible une partie de la thèse;
- M. Emmanuel ASSIDJO, mon co-encadreur en Côte d'Ivoire pour ses critiques et conseils avisés et M. Benjamin YAO, mon Directeur de département (GCAA), pour m'avoir encouragé et autorisé à réaliser cette thèse.

Je tiens également à remercier M. André LEBERT et M. Jean Pierre PAIN pour avoir accepté de juger mon travail et d'être rapporteurs de cette thèse.

Je n'oublie pas M. Alain SOMMIER pour sa formation sur les bases du contrôle commande et aussi pour avoir accepté d'être membre du jury de cette thèse.

Par ailleurs, je profite pour remercier mon compatriote Claude Narcisse NIAMBA, par qui je suis passé pour avoir cette thèse avec le département STAI de Lasalle Beauvais, et sa famille. Je n'oublie pas la famille N'GUESSAN qui m'a soutenu moralement tout le long de mon séjour.

J'adresse un remerciement tout particulier, avec affection et reconnaissance, à mon ami Etienne Zohim GNIMPIEBA, pour nos discussions scientifiques sur mon sujet et aussi son soutien sans faille à tous les niveaux depuis le démarrage de cette thèse. Je n'oublie pas notre amie commune Géraldine CORNET, bibliothécaire à Lasalle Beauvais.

Un dernier mot à l'endroit de l'organisme boursier EGIDE et de l'Institut Polytechnique LaSalle Beauvais pour avoir financé conjointement cette thèse.

**RESUME**

Cette étude porte sur l'amélioration de la qualité de la tomate séchée par microondes assistés par air chaud (MOAC). Le principal but recherché est la préservation de la qualité de la tomate séchée en évitant notamment l'apparition de tâches noires qui souvent surviennent lors d'un chauffage microondes suite à une surchauffe locale du produit quand il devient sec. Pour ce faire, un système de séchage microondes assistés par air chaud avec la capacité de contrôler automatiquement la puissance spécifique a été développé sous LabView®. Après une première étude où la puissance microondes appliquée est maintenue constante, une seconde stratégie de séchage MOAC, avec deux modes différents de régulation de la puissance spécifique, a été mise en œuvre. Ces modes consistent à ajuster la puissance microondes appliquée à la masse du produit, représentative de la quantité d'eau restante. Dans le premier mode, l'adaptation est faite toutes les secondes (ajustement "continu") alors que dans le second mode, la puissance a été ajustée seulement chaque cinq minutes (ajustement intermittent). L'ajustement permet de travailler avec un rapport puissance appliquée sur masse résiduelle du produit (puissance spécifique) constant. Tous les paramètres du procédé incluant la puissance appliquée on été enregistrés chaque seconde. De même, la température et la masse du produit sont mesurées chaque seconde. Le produit final a été caractérisé en réalisant des mesures de couleur, de texture, de structure ainsi que de taux résiduel de lycopène.

La première étude sur le séchage MOAC réalisée, à puissance constante (puissance spécifique variable), a produit des tomates avec des points chauds par endroit et plus de la moitié de la teneur en lycopène de la tomate est dégradée. En revanche, les tomates séchées par MOAC utilisant les deux modes de régulation du séchage, présentent une meilleure qualité en termes de couleur et de structures comparées à deux tomates séchées commerciales de référence (d'origine italienne et ivoirienne). Par ailleurs, l'observation de la structure des tomates par Microscopie Electronique à Balayage (MEB), a permis d'expliquer les changements observés au niveau de la texture de la tomate séchée. D'un point de vue chimique, le taux résiduel de lycopène de la tomate séchée par les modes de régulation (1 et 2) est situé respectivement entre 64,78 et 55,63% pour les puissances et températures d'air basses (3W/g-30°C) et entre 30,91 et 28,75% pour les puissances et températures d'air élevées (7W/g-50°C), contre 30,56 et 22,30% pour les tomates commerciales d'origine italienne et ivoirienne.

**Mots clés :** Séchage microondes, puissance spécifique, régulation, plan d'expériences, optimisation, tomate, lycopène.

**ABSTRACT**

The aim of this study was to improve the quality of dried tomato by the use of microwave combined to hot air (MOAC). The main point was to preserve the quality of dried tomato avoiding the appearance of black spots which often occur during microwaves heating which result from local overheating of the product when it becomes dry. Therefore, an MOAC drying system with ability of automatic control of the power density was developed under LabView®. After an initial study where the applied microwave power remained constant during the drying, a second MOAC drying strategy, with two different control modes, was implemented. These modes consisted to adjust the microwave power density to the remaining amount of water (actually the weight of the product). In the fist one, it is adjusted every second, while in the second, the power was adjusted only every 5 min. Therefore the ratio between the power applied and the weight of the product (i.e. the specific power) remained constant. All the process parameters, including the power applied and the product temperature and weight were recorded every second. The final product was characterized by performing measurements on color, texture, structure and residual lycopene content.

In our initial study on MOAC drying performed at constant power (i.e. variable specific power), we have obtained dried tomatoes with hot spots and with a residual lycopene content lower than 50%. The tomatoes dried at constant specific power showed a better physical aspect and a higher nutritional quality, even compared to two commercial products from Italy and Ivory Coast. In addition, the structure of dried tomatoes observed by Scanning Electron Microscopy (SEM) allowed to explain changes in dried tomatoes texture. Chemically, the residual rate of lycopene in tomatoes dried at constant specific power ranged respectively between 64.78 and 55.63% for low power and air temperatures (3W/g-30 °C) and between 31.91 and 28.75% for high power and air temperatures (7W/g-50° C), while only 30.56 and 22.30% for commercial tomatoes from Italy and Ivory Coast.

**Keyword**: Microwaves drying, power density, control, experimental design, optimization, tomato, lycopene.

## COMMUNICATIONS

### Publications

**- Assidjo E., Yao B., Kisselmina K., Amané D.** (2008). Modeling of an industrial drying process by artificial neural networks. *Brazilian Journal of Chemical Engineering 25(3)* 515-522.

**- Koné K.Y., Laguerre J-C., Duquenoy A. Courtois F., Assidjo E.** (2009). Caractérisation du séchage microondes de fruits et légumes via l'étude du comportement d'un produit modèle : un gel d'alginate de sodium. XII$^{ème}$ congrès de la Société Française de Génie des Procédés (SFGP). Marseille, France. *Communication Poster*

**- Koné K.Y., Druon Cyril., Delmotte M., Duquenoy A., Laguerre J-C.** (2011). Power density control in microwave assisted air drying to improve quality of food. I$^{er}$ Symposium Euro-méditerranéen (Université d'Avignon). Avignon, France. *Communication Poster*

**- Koné K.Y., Druon C., Delmotte M., Duquenoy A., Laguerre J.C.** (2011). Quality improvement of tomato dried by microwave hot air with power density control. Proposé à publication dans *Journal* of *Food Engenineering*.

### Communications orales

**KONE Kisselmina Youssouf** (Octobre 2009)**.** Etude du séchage microondes assistés par air chaud de la tomate: optimisation de la qualité du produit séché et de la consommation énergétique. Séminaire ENSIA –Massy.

**KONE Kisselmina Youssouf** (Octobre 2009). Séchage microondes assistés par air chaud de la tomate: optimisation de la qualité du produit séché et de la consommation énergétique. Comité Scientifique Lasalle Beauvais.

**Jean Claude Laguerre, KONE Kisselmina Youssouf**, (Octobre 2010). Maîtrise de la qualité de la tomate séchée par un procédé microondes/air chaud grâce à un dispositif de contrôle-commande basé sur le pilotage de la puissance spécifique. Comité Scientifique Lasalle Beauvais.

**Workshop (Atelier)**

Initiation au logiciel de modélisation et de simulation "COMSOL Multiphysics" - l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs Léonard de Vinci de Paris - Département Calcul Scientifique; le 06 décembre 2007.

**Modules suivis**

- Initiation à la gestion de projet, conduire sa thèse comme un projet (2 et 3 mars 2009).
- Préparation à l'insertion professionnelle: la thèse, au service de mon projet professionnel et personnel (avril 2009).
- Sciences et société, débat public et controverses – (juillet 2009)
- Journées ABIES 17 et 18 mars 2009
- Journées ABIES 1 er 2 avril 2010
- Write Right Niveau 1- Rédaction et structuration de l'article scientifique (juillet 2011).
- Séminaire Projet AFOMDnet (16-20 aout 2010) - "Les étapes de traitement des articles par des revues scientifiques : évaluation, acceptation ou rejet, édition et diffusion. Comment mieux répondre aux exigences des revues scientifiques ?"

# TABLE DES MATIERES

**AVANT PROPOS & REMERCIEMENTS ..... II**
**RESUME ..... III**
**ABSTRACT ..... IV**
**COMMUNICATIONS ..... V**
**INTRODUCTION GENERALE ..... 1**
**1ERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE ..... 3**
**I.1- GENERALITES SUR LA TOMATE ..... 5**
I.1.1-INTRODUCTION ..... 5
I.1.2- TOMATE : PRODUCTION ET CARACTERISTIQUES ..... 5
*I.1.2.1- PRODUCTION DE LA TOMATE ..... 5*
*I.1.2.2- VARIETES DE TOMATE ..... 6*
*I.1.2.3- COMPOSITION BIOCHIMIQUE DE LA TOMATE ..... 7*
I.1.2.3.1- Constituants majeurs ..... 7
I.1.2.3.2- Constituants mineurs ..... 7
I.1.2.3.3- Antioxydants de la tomate ..... 8
I.1.2.3.4- Lycopène ..... 9
I.1.3- QUALITE DE LA TOMATE SECHEE ..... 10
*I.1.3.1- NORMES EUROPEENNES REQUISES POUR LA TOMATE SECHEE ..... 10*
*I.1.3.2- CARACTERISTIQUES DES TOMATES COMMERCIALES SECHEES ..... 11*
*I.1.3.3-EFFET DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR LA QUALITE DE LA TOMATE ..... 12*
I.1.3.3.1- Effet sur la couleur ..... 12
I.1.3.3.2- Effet sur la texture ..... 13
I.1.3.3.3- Effet sur la structure ..... 13
I.1.3.3.4- Effet sur le lycopène ..... 14
**I.2- GENERALITES SUR LE SECHAGE PAR MICROONDES ..... 16**
I.2.1- INTRODUCTION ..... 16
I.2.2- QUELQUES RAPPELS SUR LE SECHAGE ..... 16
*I.2.2.1- DEFINITIONS ET FONCTIONNEMENT ..... 16*
*I.2.2.2- PRINCIPE PHYSIQUE DU SECHAGE ..... 16*
I.2.2.2.1- Séchage par entrainement ..... 16
I.2.2.2.2- Séchage par ébullition ..... 17
I.2.2.2.3- Modes d'apport de la chaleur ..... 17
I.2.2.2.4- Périodes du séchage par entrainement ..... 17
I.2.2.2.5- Périodes du séchage par ébullition ..... 20
I.2.3- SECHAGE PAR MICROONDES ..... 21
*I.2.3.1- DEFINITION ..... 21*
*I.2.3.2- MECANISME DE CHAUFFAGE DES MICROONDES ..... 22*
I.2.3.2.1- Principe ..... 22
I.2.3.2.2- Relaxation diélectrique ..... 22

*I.2.3.3- PARAMETRES INFLUENÇANT LE SECHAGE MICROONDES ..... 23*
I.2.3.3.1- Propriétés diélectriques des aliments ..... 23
I.2.3.3.2- Puissance microondes dissipée ..... 24
I.2.3.3.3- Profondeur de pénétration des microondes ..... 25
I.2.3.3.4- Effet du facteur de perte ..... 26
*I.2.3.4- EVOLUTION DE LA TEMPERATURE AU COURS DU SECHAGE MICROONDES ..... 29*
I.2.4- TECHNOLOGIES DE SECHAGE COMBINEES AUX MICROONDES ..... 29
*I.2.4.1- SECHAGE PAR MICROONDES SOUS VIDE ..... 29*
*I.2.4.2- SECHAGE PAR MICROONDES COMBINE A LA LYOPHILISATION ..... 30*
*I.2.4.3- SECHAGE EN LIT FLUIDISE COMBINE AUX MICROONDES ..... 31*
*I.2.4.4- SECHAGE PAR MICROONDES COMBINE A L'AIR CHAUD ..... 31*
**I.3- PILOTAGE ET MODELISATION DU SECHAGE MICROONDES ..... 32**
I.3.1- INTRODUCTION ..... 32
I.3.2- PILOTAGE DU SECHAGE MICROONDES ..... 32
*I.3.2.1- DIFFERENTES STRATEGIES DE CONTROLE COMMANDE ..... 32*
*I.3.2.2- ADAPTATION DE LA PUISSANCE MICROONDES LORS DU SECHAGE ..... 33*
I.3.2.2.1- Action en tout ou rien sur la puissance microondes suivant un schéma prédéfini (fonctionnement par intermittence) ..... 33
I.3.2.2.2- Adaptation de la puissance microondes par étapes et en fonction de la teneur eau ..... 34
*I.3.2.3- REGULATION DE LA TEMPERATURE DU PRODUIT LORS DU SECHAGE MICROONDES ..... 35*
I.3.3- MODELISATION DU SECHAGE MICROONDES COMBINE A L'AIR CHAUD ..... 35
*I.3.3.1- MODELES THEORIQUES ..... 36*
*I.3.3.2- MODELES SEMI-THEORIQUES ..... 37*
*I.3.3.3- MODELES EMPIRIQUES ..... 39*
**I.4- SYNTHESE ET CONCLUSION ..... 40**
**2EME PARTIE : MATERIELS ET METHODES ..... 42**
**II.1- DESCRIPTION ET CARACTERISATION DU MATERIEL D'ETUDE ..... 44**
II.1.1- DISPOSITIF EXPERIMENTAL ..... 44
*II.1.1.1-DESCRIPTIF DU SECHOIR PILOTE ..... 44*
*II.1.1.2- MODIFICATIONS APPORTEES AU PILOTE ..... 47*
*II.1.1.3- PARAMETRES REGLABLES DU SECHOIR ..... 49*
II.1.1.3.1-Puissances microondes appliquée ..... 49
II.1.1.3.2-Température de l'air de séchage ..... 49
II.1.1.3.3-Vitesse de l'air de séchage ..... 49
*II.1.1.4- PARAMETRES MESURABLES DU SECHOIR ..... 50*
II.1.1.4.1-Puissances appliquée (ou incidente) et réfléchie ..... 50
II.1.1.4.2-Température de l'air de séchage ..... 50
II.1.1.4.3- Température du produit ..... 50
II.1.1.4.4-Perte de masse du produit ..... 50
II.1.1.4.5- Consommation énergétique au cours du traitement ..... 51

*II.1.1.5- ACQUISITION ET COMMANDE DE LA PUISSANCE APPLIQUEE ..... 51*
II.1.1.5.1-Diagramme de pilotage ..... 52
II.1.1.5.2-Lancement d'un essai de séchage ..... 53
II.1.2- MATERIEL VEGETAL ..... 54
*II.1.2.1-CHOIX DE LA VARIETE DE TOMATE ..... 54*
*II.1.2.2-PREPARATION DE L'ECHANTILLON ..... 54*
*II.1.2.3-CARACTERISATION DU MATERIEL VEGETAL ..... 54*
II.1.2.3.1-Détermination de la teneur en eau ..... 54
II.1.2.3.2-Interprétation des mesures de masse ..... 55
II.1.2.3.3-Mesure des indicateurs de qualité physique des produits ..... 55
II.1.2.3.4-Mesure du taux résiduel en lycopène ..... 58
**II.2- DESCRIPTION DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL ..... 59**
II.2.1- DIFFERENTES STRATEGIES DE SECHAGE ..... 59
*II.2.1.1-STRATEGIE 1 : SECHAGE SANS REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE ..... 59*
*II.2.1.2- STRATEGIE 2 : SECHAGE AVEC REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE EN CONTINU ..... 59*
II.2.1.2.1- Mode 1 : Régulation de la puissance spécifique en continu chaque seconde . 59
II.2.1.2.2- Mode 2 : Régulation de la puissance spécifique par intermittence de 5 minutes ..... 59
II.2.2- ANALYSE DES DONNEES ..... 60
*II.2.2.1-PRETRAITEMENT DES DONNEES BRUTES ..... 60*
*II.2.2.2- ANALYSES STATISTIQUES ..... 60*
**II.3- MODELISATION ET OPTIMISATION DU SECHAGE MICROONDES AIR CHAUD ..... 61**
II.3.1- MODELISATION DE L'EVOLUTION DES TENEURS EN EAU REDUITES ..... 61
*II.3.1.1-MODÈLES DE LA DIFFUSIVITÉ APPARENTE ..... 61*
*II.3.1.2-MODÈLES DE REPRÉSENTATION ..... 61*
II.3.2- OPTIMISATION DU SECHAGE MICROONDES AIR CHAUD DE LA TOMATE EN TERMES DE QUALITE ET DE CONSOMMATION ENERGETIQUE ..... 63
*II.3.2.1- OBJECTIF DE L'ETUDE D'OPTIMISATION ..... 63*
*II.3.2.2- DESCRIPTION DU PROCEDE ..... 63*
*II.3.2.3- FACTEURS DE L'ETUDE ..... 63*
II.3.2.3.1- Puissance spécifique (Ps) ..... 63
II.3.2.3.2- Durée d'intermittence (DI) ..... 64
II.3.2.3.3- Température de l'air de séchage (Ta) ..... 64
*II.3.2.4- CHOIX DU PLAN EXPERIMENTAL ..... 64*
*II.3.2.5- DOMAINE DE L'ETUDE ET CONSTRUCTION DU PLAN EXPERIMENTAL DE DOEHLERT ..... 65*
*II.3.2.6- VARIABLES REPONSES ..... 67*
*II.3.2.7- ANALYSE DES DONNEES ..... 68*
**3EME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSIONS ..... 70**
**III.1- SECHAGE MICROONDE/AIR CHAUD SANS REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE (A PUISSANCE APPLIQUEE FIXE) ..... 72**

III.1.1- CARACTERISATION DU SECHAGE MICROONDES AIR CHAUD (MOAC) SANS REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE ..... 72
*III.1.1.1- INFLUENCE DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE SUR LES CINETIQUES ET VITESSES DE SECHAGE..... 72*
*III.1.1.2- EVOLUTION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE AU COURS DU SECHAGE..... 74*
III.1.2- EVALUATION DE LA QUALITE DE LA TOMATE SECHEE SANS REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE ..... 76
*III.1.2.1- COULEUR..... 76*
*III.1.2.2- TAUX RESIDUEL EN LYCOPENE..... 77*
III.1.3- CONCLUSION PARTIELLE ..... 78
**III.2- SECHAGE MICROONDE/AIR CHAUD AVEC REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE..... 79**
III.2.1– CARACTERISATION DU SECHAGE MICROONDES/ AIR CHAUD AVEC REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE ..... 79
*III.2.1.1- REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE..... 80*
III.2.1.1.1- Mode 1 : Séchage avec adaptation de la puissance appliquée à la masse du produit en continu (à chaque seconde) – régulation en continu de la puissance spécifique ..... 80
III.2.1.1.2- Mode 2 : séchage avec adaptation de la puissance appliquée à la masse du produit par intermittence (toutes les 300 secondes) – régulation de la puissance spécifique par intermittence ..... 82
*III.2.1.2-CARACTERISATION DES COURBES DE SECHAGE EN REGULATION CONTINUE..... 84*
III.2.1.2.1- Influence de la puissance microondes sur les cinétiques et vitesses de séchage ..... 84
III.2.1.2.2- Influence de la température de l'air sur les cinétiques et vitesses de séchage 86
III.2.1.2.3- Evolution de la température du produit au cours du séchage ..... 88
III.2.1.2.4- Evolution de la vitesse de séchage en fonction de la puissance absorbée ..... 90
*III.2.1.3- BILAN THERMIQUE EVAPORATOIRE..... 91*
*III.2.1.4-EVALUATION DES INDICATEURS DE QUALITE EN REGULATION CONTINUE..... 92*
III.2.1.4.1- Couleur..... 92
III.2.1.4.2- Texture ..... 100
III.2.1.4.3- Structure ..... 102
III.2.1.4.4- Taux résiduel de lycopène..... 104
III.2.2 – COMPARAISON DU SECHAGE MOAC EN PILOTAGE CONTINU ET PAR INTERMITTENCE ..... 106
*III.2.2.1-COMPARAISON DE LA QUALITE..... 106*
III.2.2.1.1- Couleur..... 106
III.2.2.1.2- Texture ..... 108
III.2.2.1.3- Taux résiduel de lycopène..... 109
*III.2.2.2-COMPARAISON DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE MASSIQUE (CEM)..... 110*
III.2.2.2.1- CEM en pilotage continu (CEMc)..... 110
III.2.2.2.2- CEM en pilotage par intermittence (CEMi) ..... 111

*III.2.2.3-Comparaison des différentes CEM et conclusion ..... 112*
**III.3- MODELISATION ET OPTIMISATION DU PROCEDE DE SECHAGE MICROONDES /AIR CHAUD ..... 113**
III.3.1- MODELISATION ET SIMULATION DU PROCEDE ..... 113
*III.3.1.1-Etablissement des modèles prédictifs du transfert hydrique ..... 113*
III.3.1.1.1- Modèles de la diffusivité apparente de l'eau ..... 113
III.3.1.1.2- Modèles de représentation ..... 115
III.3.2- OPTIMISATION DU SECHAGE MICROONDES AIR CHAUD DE LA TOMATE PAR LA METHODE CLASSIQUE ET CORICO ..... 122
*III.3.2.1-OPTIMISATION PAR LA METHODE CLASSIQUE UTILISANT LA METHODE DES SURFACES DE REPONSES ..... 122*
III.3.2.1.1- Modèles quadratiques ..... 122
III.3.2.1.2- Validité des modèles ..... 128
III.3.2.1.3- Qualité des modèles ..... 129
III.3.2.1.4- Désirabilité et poids des différentes réponses ..... 132
III.3.2.1.5- Etude de l'influence des effets et des interactions sur les réponses ..... 133
III.3.2.1.6- Détermination des conditions optimales du séchage MOAC pour la qualité de la tomate ..... 139
*III.3.2.2-OPTIMISATION PAR LA METHODE CORICO ..... 141*
III.3.2.2.1- Modèles CORICO ..... 141
III.3.2.2.2- Conditions optimales et validation des modèles sous CORICO ..... 145
III.3.2.3.1- Surface de réponse en 3D ..... 146
III.3.2.3.2- Rapport F ..... 151
**III.4- SYNTHESE DES RESULTATS ..... 152**
III.4.1- ASPECT PROCESS ..... 152
III.4.2- ASPECT QUALITE ..... 153
III.4.3- ASPECT OPTIMISATION ET MODELISATION ..... 154
**CONCLUSION GENERALE & PERSPECTIVES ..... 155**
**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ..... 157**
**ANNEXES ..... 169**

**LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES**

***Abs*** : Absorbance ou densité optique (DO) de l'échantillon,
**CEE-ONU**: Commission Economique des Nations Unies pour l'Europe
**CEM** : Consommation énergétique massique (kJ/kg)
**CEMc** : Consommation énergétique massique en pilotage continu (kJ/kg)
**CEMi** : Consommation énergétique massique en pilotage par intermittence (kJ/kg)
**CIE Lab**: Commission Internationale d'Eclairage (Modèle L*a*b* paramètres de couleur)
**DFR GCAA** : Département formation et Recherche Génie Chimique et Agroalimentaire
**DI** : Durée d'intermittence (s)
**E.T**: Ecart-type
$E_{ab}$ : Energie absorbée par le produit (J)
$E_{vap}$ :Energie d'évaporation de l'eau (J)
**exp**: expérimental
$F_d$ : Facteur de dilution
**Ferm** : Fermeté de la tomate
$\mathbf{F_{maxTF}}$ : Force maximale de perforation de la tomate fraîche (N)
$\mathbf{F_{maxTS}}$ : Force maximale de perforation de la tomate séchée (N)
**INP-HB** : Institut National Polytechnique – Houphouët Boigny (Côte d'Ivoire)
**IPGRI:** International Plant Genetic Resource Institute
**LabVIEW** : Logiciel de développement et d'application de National Instrument basé sur un langage de programmation graphique (langage G)
**MEB** : Microscopie Electronique de Balayage
$M_e$ : Masse d'eau évaporée (kg)
**MES Technologies** : Microondes Energie Systèmes Technologies
$m_{ech}$ : masse de l'échantillon (g)
**MO** : Microondes
**MOAC** : Microondes combinés à l'air chaud
**MS** : Matière sèche (g)
$m_p$ : Masse du produit (g)
**MSR :** Méthodologie par les surfaces de réponses
**NI** : National Instrument
**PME** : Pectine Méthylestérase (Enzyme)
**PR** : "Pulse ratio" ou Ratio d'impulsion
**pre** : prédite
$\mathbf{P_s}$ : Puissance spécifique (W/g)
$\mathbf{P_{sf}}$: Puissance spécifique finale (W/g)
$\mathbf{P_{si}}$ : Puissance spécifique initiale (W/g)
**REQM** : Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne
**RSM** : Response Surface Methodology

$\dot{m}$ : Débit de matière (kg/s)

$\varepsilon''$ : Facteur de perte diélectrique ou coefficient d'absorption

$\delta$: angle de perte diélectrique

$\rho$ : Masse volumique (kg/m$^3$)

$\theta$: Température du produit au temps t(°C)

$\varepsilon^*$ : Constante diélectrique complexe

$\varepsilon'$ : Permittivité relative ou constante diélectrique

$\varepsilon_0$ : Permittivité du vide (F.m$^{-1}$)

$\theta_0$: Température initiale du produit (°C)

$\chi^2$ : Khi deux

$\theta_a$: Température de l'air (°C)

$\theta_{ch}$ : Température de la source chaude (°C)

$\Delta E$ : différence de couleur totale

$\theta_{eb}$ : Température de d'ébullition (°C)

$\Delta H_v$ : Chaleur latente de vaporisation de l'eau (kJ/kg)

$\varepsilon_{Lyc}$ : Coefficient d'extinction molaire (L.mol$^{-1}$.cm$^{-1}$)

$\theta_s$ : Température à la surface du produit (°C)

$\dot{Q}$ : Débit de chaleur (W)

**A** : Surface de contact de l'air avec le produit (m²)

$a^*$ : Paramètre du système de mesure des couleurs CIE représentant la couleur rouge et verte

***a, b, c, k, , $k_1$, $k_2$, $k_3$, n***: constantes des modèles semi-empiriques

$a_w$ : Activité de l'eau

$a_{w,s}$ : Activité de l'eau à la surface du produit

$b^*$ : Paramètre du système de mesure des couleurs CIE représentant la couleur jaune et bleu

***C*** : Teneur en lycopène du produit séché (mg/g de MS)

$C^*$ : Paramètre du système de mesure des couleurs CIE représentant la saturation

$C_0$ : Teneur en lycopène du produit frais (mg/g de MS)

$C_{Lyc}$ : Teneur en lycopène (mg/kg de produit)

$C_p$ : Chaleur spécifique (J/kg.K)

$D_{ap}$ **:** Diffusivité apparente (m²/s)

***E*** : Force du champ électrique (V/m)

$E_{tot}$ : Energie totale consommée (kJ)

*f'* : Fréquence du champ électromagnétique (Hz)

***h :*** Coefficient de transfert de chaleur (W.m$^{-2}$.K$^{-1}$)

$h°$ : Paramètre du système de mesure des couleurs CIE représentant l'angle de teinte

***k*** : conductivité thermique du produit (W/m.K)

$k_p$ : Coefficient de transfert de matière (kg eau.m$^{-2}$.s$^{-1}$.Pa$^{-1}$)

***L*** **:** épaisseur du produit (m)

**$L^*$** : Paramètre du système de mesure des couleurs CIE représentant la luminance

**Lyc_rés** : Taux résiduel de lycopène (%)

$m_i$ : Masse du produit à l'instant i (g)

$m_{i+1}$ : Masse du produit à l'instant i+1 (g)

$M_{Lyc}$ : Masse molaire du lycopène ($C_{40}H_{56}$) : 536,87 $g.mol^{-1}$

**n** : indice du terme de la série

**N** : Nombre d'observations

$n_{kwh}$ : nombre de kWh consommé

$n_p$ : nombre de constantes du modèle

$p$ : Pression de vapeur d'eau (Pa)

$p'_\theta$ : Pression de vapeur saturante (Pa)

$P_{ab}$ : Puissance absorbée (W)

$P_{ap}$ : Puissance appliquée (W)

$P_D$ : Densité de puissance microondes dissipée ($W/m^3$)

$P_i$ : Puissance incidente (W)

$P_r$ : Puissance réfléchie (W)

$p_s$ : Pression de vapeur d'eau à la surface du produit (Pa)

$p_t$ : Pression totale ambiante (Pa)

$R$ : rayon de la sphère (m)

$r$ : rayon du cylindre (m)

$R^2$ : Coefficient de détermination

**SEM** : Scanning Electron Microscopy

**STAI** : Sciences et Techniques Agro-industrielles

**Ta** : Température de l'air (°C)

**TEAC**: Capacité Antioxydante Equivalente Trolox

$t_{off}$ : Temps d'arrêt (s)

$t_{on}$ : Temps de mise en marche (s)

$V_d$ : Volume d'hexane pour l'extraction (mL).

**x** : coefficient de consigne manuel pour la puissance appliquée

$X_0$ : Teneur en eau initiale (kg eau/kg de MS)

$X_e$ : Teneur en eau d'équilibre (kg eau/kg de MS)

$X_r$ : Teneur en eau réduite (kg eau/kg de MS)

$\alpha$: Facteur multiplicatif de la puissance spécifique

$\varepsilon_0$ : Constante diélectrique du vide ($8,85.10^{-12}$ F/m)

## LISTE DES FIGURES

**Figure 1.1**- Variétés de tomate classées selon la forme ..... 6
**Figure 1.2**- Structure moléculaire du lycopène ..... 10
**Figure 1.3**- Micrographes électroniques de balayage de champignon sec: (a) séché à l'air à 60°C, (b) séché aux microondes sous-vide à la pression de 20 kPa et (c) séché aux microondes sous-vide à 10 kPa ..... 14
**Figure 1.4**- Graphe d'interaction température- puissance sur le lycopène total résiduel et le niveau d'isomérisation trans-cis. ..... 15
**Figure 1.5** - a : Cinétique de séchage à air chaud d'un matériau capillaro-poreux ; b : Evolution de la température d'un matériau capillaro-poreux lors d'un séchage à l'air chaud ; c : Vitesse de séchage d'un matériau capillaro-poreux lors d'un séchage à l'air chaud. ..... 18
**Figure 1.6**- Schématisation des transferts pendant la période 1 du séchage par entrainement ..... 19
**Figure 1.7**- Schématisation des transferts pendant la phase 2 (Lecharpentier, 2000) ..... 20
**Figure 1.8**- Le spectre électromagnétique où se localise les microondes (hyperfréquence) (Heistercamp et al, 2002) ..... 22
**Figure 1.9**- Mouvement d'un dipôle dans un champ électrique (Singh & Heldman, 2001). ..... 22
**Figure 1.10**- Transit de puissance lorsqu'une onde électromagnétique atteint un matériau diélectrique possédant un important facteur de perte (Callebaut, 2007). ..... 26
**Figure 1.12**- Schéma d'une molécule d'eau (Heistercamp et al., 2002) ..... 27
**Figure 1.13**- Pertes diélectriques associées aux différentes formes d'eau (Thuéry, 1989) ..... 28
**Figure 1.14**- Illustration schématique d'un type de régulation de la puissance appliquée au cours du séchage MOAC de la banane (Pereira, Marsaioli, & Ahrné, 2007). ..... 34
**Figure 1.15**- Typologie des modèles de séchage microondes dans la littérature ..... 36
**Figure 2.1**- Photo du séchoir microondes / air convectif pilote de laboratoire ..... 44
**Figure 2.2**– Représentation schématique du système expérimental de séchage microondes-air convectif ..... 45
**Figure 2.3**- Schéma simplifiée du bolomètre (source : Bouchier et al., 2008) ..... 46
**Figure 2.4** – a : Ancien plateau porte échantillon dans l'applicateur monomode ; b : nouveau plateau porte échantillon dans l'applicateur monomode ..... 48
**Figure 2.5** - Propagation de l'onde électromagnétique dans un applicateur monomode combiné au système de pesée rotatif (a), à la différence de l'applicateur multimode (b) (Callebaut, 2007) où plusieurs modes de propagation de l'onde arrivent sur l'aliment et dans toutes les directions. ..... 48
**Figure 2.6**- Diagramme de pilotage de la puissance spécifique au cours du séchage ..... 53
**Figure 2.7**- a- Représentation de l'angle de teinte (h°) et de la saturation ou chroma (C) b Différentes couleurs de teintes en fonction des angles (Minolta KONIKA, 2003). ..... 56
**Figure 2.8**- Plan de Doehlert à 3 facteurs. Représentation dans l'espace ..... 65
**Figure 2.9** - Illustration des différentes interactions ..... 69
**Figure 3.1**- Variation de la teneur en eau de la demi-tomate en fonction du temps à différentes conditions de séchage (MOAC ..... 72

**Figure 3.2**- Variation de la vitesse de séchage de la demi-tomate en fonction de la teneur en eau à différentes conditions de séchage MOAC ..... 73

**Figure 3.3**- Evolution de la puissance spécifique en fonction du temps de séchage à différentes conditions. ..... 74

**Figure 3.4**-Tomates séchées par microondes combinées à l'air chaud (40°C) sans régulation de la puissance spécifique. a : 1 W/g ; b : 2W/g et c : 2,5 W/g. ..... 75

**Figure 3.5**- Influence de la puissance spécifique combinée à l'air chaud (40°C) sur la couleur des tomates séchées. Evolution des paramètres de couleur pour différentes conditions de séchage MOAC (40°C). ..... 76

**Figure 3.6**- Effet du traitement microondes combiné à l'air chaud (40°C) sur la teneur résiduelle en lycopène. ..... 78

**Figure 3.7**- Puissance spécifique régulée en continu (cycle d'1 s) à la "proportionnelle de la masse" de la tomate séchée à différentes conditions : 3, 5, et 7 W/g à 40°C. ..... 80

**Figure 3.8**- Fluctuation de la mesure de la masse de l'échantillon en fin de séchage à différentes conditions : 3W/g-40°C , 5W/g-40°C et 7 W/g-40°C. ..... 81

**Figure 3.9**- Puissance spécifique régulée par intermittence (cycle de 300 s) à la "proportionnelle de la masse" de la tomate séchée dans différentes conditions : 3, 5, 7 W/g à 40°C. ..... 82

**Figure 3.10**- Impact de la puissance sur la cinétique de séchage. Evolution de la teneur en eau de la tomate à différentes conditions de séchage MOAC (3 W/g-40°C, 5 W/g-40°C et 7 W/g-40°C) avec régulation de la puissance spécifique en continu chaque seconde. ..... 84

**Figure 3.11**- Effet de la puissance spécifique sur la vitesse de séchage à différentes conditions de séchage MOAC (40°C) en régulation continue de la puissance spécifique. ..... 85

**Figure 3.12**- Evolution de la teneur en eau de la tomate à différentes conditions de séchage (5 W/g-30°C, 5 W/g-40°C et 5 W/g-50°C) avec régulation de la puissance spécifique en continu chaque seconde. ..... 86

**Figure 3.13**- Effet de la température de l'air sur vitesse du séchage de la tomate à différentes conditions microondes /air chaud en régulation continue de la puissance spécifique (5W/g). ..... 87

**Figure 3.14**- Evolution de la température de la tomate au cours séchage MOAC avec régulation de la puissance spécifique en continu à différentes conditions: 3W/g-40°C, 5W/g-40°C et 7 W/g-40°C ..... 88

**Figure 3.15**- Evolution de la puissance microondes absorbée et de la température du produit en fonction de la teneur en eau en pilotage continu (chaque seconde) de la puissance spécifique, avec fixation de température de l'air à 40°C ..... 89

**Figure 3.16**- Vitesse de séchage de la demi-tomate en fonction de la puissance absorbée au cours du séchage MOAC (40°C) à différentes conditions de séchage ..... 90

**Figure 3.17**- Bilan thermique évaporatoire en séchage MOAC avec régulation de la puissance spécifique à différentes conditions (3W/g-40°C, 5W/g-40°C, 7W/g-40°C). ..... 91

**Figure 3.18a**- Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre L*(Luminance) des demi-tomates séchées par MOAC (40°C) pour différents niveaux de puissances spécifiques.

Comparaison du paramètre L* de la tomate fraiche, séchée par MOAC et des tomates commerciales italienne et ivoirienne. ..... 93

**Figure 3.18b**- Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre a*(teinte rouge) des demi-tomates séchées par MOAC (40°C) pour différentes puissances spécifiques. Comparaison du paramètre a* de la tomate fraiche, séchée par MOAC et des tomates commerciales italienne et ivoirienne. ..... 94

**Figure 3.18c-** Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre b*(teinte jaune) des demi-tomates séchées par MOAC (40°C) pour différentes puissances spécifiques. Comparaison du paramètre b* de la tomate fraiche, séchée par MOAC et des tomates commerciales italienne et ivoirienne. ..... 95

**Figure 3.18d**- Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre a*/b* des demi-tomates séchées par MOAC (40°C) pour différentes puissances spécifiques. Comparaison du paramètre a*/b* de la tomate fraiche, séchée par MOAC et des tomates commerciales italienne et ivoirienne. ..... 96

**Figure 3.18e**- Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre C* (saturation) des demi-tomates séchées par MOAC (40°C) pour différentes puissances spécifiques. Comparaison du paramètre C* de la tomate fraiche, séchée par MOAC et des tomates commerciales italienne et ivoirienne. ..... 97

**Figure 3.18f**- Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre h° (angle de teinte) des demi-tomates séchées par MOAC (40°C) pour différentes puissances spécifiques. Comparaison du paramètre h° de la tomate fraiche, séchée par MOAC et des tomates commerciales italienne et ivoirienne. ..... 98

**Figure 3.19**- Photos des tomates séchées par MOAC avec régulation de la Ps en continu à différentes conditions de séchage comparées à celles des tomates commerciales séchées au soleil (j : origine Italie ; k : origine Côte d'Ivoire). ..... 99

**Figure 3.20**- Effet de la puissance spécifique et de la température de l'air sur la fermeté de la tomate séchée à différentes conditions. Comparaison avec les tomates commerciales d'origine italienne et ivoirienne. ..... 100

**Figure 3.21**- Micrographies (x100 mm) des échantillons de tomate séchés au MOAC avec pilotage de la puissance spécifique à différentes conditions de séchage, comparées à celles des tomates du commerce d'origine italienne et ivoirienne. ..... 102

**Figure 3.22**- Effet de la puissance MO sur la teneur en lycopène résiduel de la tomate séchée par MOAC (à 40°C) avec régulation de Ps à différentes conditions de séchage. Comparaison du taux résiduel en lycopène des tomates séchées par MOAC (40°C) et des tomates commerciales. ..... 104

**Figure 3.23**- Effet de la température sur le taux résiduel en lycopène de la tomate séchée par MOAC (à 5 W/g et température d'air variable) avec régulation de Ps à différentes conditions de séchage. Comparaison du taux résiduel en lycopène des tomates séchées par MOAC (à 5W/g) et des tomates commerciales. ..... 105

**Figure 3.24**- Comparaison de la texture obtenue par séchage MOAC (40°C) de la tomate au cours des modes de pilotage de la puissance spécifique en continu (mode 1) et par intermittence de 5 min (mode 2). ..... 108

**Figure 3.25**- Structure de la tomate séchée vue au microscope électronique à balayage (x100 mm) à 3 W/g-40°C : a- en pilotage continu ; b-pilotage par intermittence de 5 minutes. ..... 108

**Figure 3.26**- Effet des deux modes de régulation sur la teneur en lycopène résiduel au cours du séchage MOAC de la demi-tomate ..... 109

**Figure 3.27**- Consommation énergétique massique totale au cours du séchage MOAC avec pilotage de Ps en continu à différentes conditions de séchage. ..... 110

**Figure 3.28**- Consommation énergétique massique totale au cours du séchage MOAC avec pilotage de Ps par intermittence de 5 minutes à différentes conditions de séchage. ..... 111

*Les barres de CEMi même couleur, portant des lettres différentes sont significativement différentes ($p < 0,05$). ..... 111

**Figure 3.29**- Comparaison de la consommation énergétique massique en pilotage de la puissance spécifique en continu et par intermittence (CEMc. et CEMi). ..... 112

**Figure 3.30**- Variation de ln(Xr) avec le temps à différentes conditions de séchage MOAC (40°C) de la demi-tomate. ..... 115

**Figure 3.31**- Variation des teneurs en eau expérimentale et prédite par le modèle d'Henderson et Pabis modifié aux différentes conditions de séchage MOAC (30°C). ..... 117

**Figure 3.32**- Variation des teneurs en eau expérimentale et prédite par le modèle d'Henderson et Pabis modifié aux différentes conditions de séchage MOAC (40°C). ..... 117

**Figure 3.33**- Variation des teneurs en eau expérimentale et prédite par le modèle d'Henderson et Pabis modifié aux différentes conditions de séchage MOAC (50°C). ..... 121

**Figure 3.34**- Comparaison des réponses calculées et mesurées pour les réponses : a : durée de séchage (DS); b : consommation énergétique massique totale (CEM). ..... 128

**Figure 3.35**- Comparaison des réponses calculées et mesurées pour les réponses : a - paramètre variation de la couleur rouge ($\Delta a^* = Da$); b - paramètre de saturation de la couleur (C*) ; c - paramètre de variation de la teinte ($\Delta h° = Dh$) ; d- fermeté (Ferm) ; e – taux résiduel en lycopène (Lyc_Rés) ..... 129

**Figure 3.36**- Surface de réponse 3D illustrant l'effet de l'interaction entre la puissance spécifique et la température de l'air sur la durée de séchage MOAC de la demi-tomate. ..... 133

**Figure 3.37**- Surface de réponse 3D illustrant l'effet de l'interaction entre la puissance spécifique et la température de l'air sur la CEM du séchage MOAC de la demi-tomate. ..... 134

**Figure 3.38**- Surface de réponse 3D illustrant l'effet de l'interaction entre la puissance spécifique et la durée d'intermittence sur le paramètre couleur rouge $\Delta a^*$ de de la demi-tomate séchée par MOAC ..... 135

**Figure 3.39**- Surface de réponse 3D illustrant l'effet de l'interaction entre la puissance spécifique et la durée d'intermittence sur le paramètre de saturation de la couleur C* de la demi-tomate séchée par MOAC. ..... 136

**Figure 3.40**- Surface de réponse 3D illustrant l'effet de l'interaction entre la puissance spécifique et la température de l'air sur l'écart de teinte $\Delta h°$ de la demi-tomate séchée par MOAC..... 137
**Figure 3.41**- Surface de réponse 3D illustrant l'effet de l'interaction entre la puissance spécifique et la durée d'intermittence sur la fermeté de la demi-tomate séchée par MOAC. ..... 138
**Figure 3.42**- Surface de réponse 3D illustrant l'effet de l'interaction entre la puissance spécifique et la durée d'intermittence sur le taux résiduel de lycopène de la demi-tomate séchée par MOAC. . 138
**Figure 3.43**- Confrontation entre réponses mesurées et réponses prédites des différents modèles pour les conditions optimales de séchage MOAC ..... 140
**Figure 3.44**- Validation entre les réponses prédites et les réponses expérimentales ..... 145
**Figure 3.45**- Comparaison surface de réponse 3D du paramètre couleur $\Delta a^*$ : a-méthode CORICO ; b-méthode classique ..... 146
**Figure 3.46**- Comparaison des surfaces de réponse 3D du paramètre couleur C* : a-méthode CORICO ; b-méthode classique ..... 147
**Figure 3.47**- Comparaison des surfaces de réponse 3D du paramètre couleur $\Delta h°$ : a-méthode CORICO ; b-méthode classique ..... 147
**Figure 3.48**- Comparaison des surfaces de réponse 3D de la fermeté : a-méthode CORICO ; b-méthode classique ..... 148
**Figure 3.49**- Comparaison des surfaces de réponse 3D du taux résiduel de lycopène : a-méthode CORICO ; b-méthode classique ..... 149
**Figure 3.50**- Comparaison des surfaces de réponse 3D de la durée de séchage: a-méthode CORICO ; b-méthode classique ..... 149
**Figure 3.51**- Comparaison des surfaces de réponse 3D de la consommation énergétique massique : a-méthode CORICO; b-méthode classique ..... 150

## LISTE DES TABLEAUX

**Tableau 1.1**-Teneur en lycopène dans les tomates fraiches et dans différents produits à base de tomate consommés ( Markovic, Hruskar, & Vahcic, 2006). ..... 8
**Tableau 1.2**- Principaux antioxydants et l'activité antioxydante des différentes fractions de la tomate (Toor & Savage, 2005) . ..... 9
**Tableau 1.3**- Norme internationale relative aux teneurs en eau des tomates séchées (CEE-ONU, 2007). ..... 11
**Tableau 1.4**- Caractéristiques diélectriques de l'eau pour une fréquence de 2,450 GHz (Zagrouba, 1993) ..... 28
**Tableau 2.1**- Modèles appliqués à la description des courbes de séchage donnés par différents auteurs (Soysal, Oztekin, & Eren, 2006) ..... 62
**Tableau 2.2**- Changement d'échelle pour un plan de Doehlert à trois facteurs ..... 66
**Tableau 2.3**- Domaine expérimental ..... 66
**Tableau 2.4**- Valeurs réelles des essais du plan expérimental ..... 67
**Tableau 3.1**- Facteur multiplicatif de la puissance spécifique ($\alpha$) en fin de séchage MOAC .... 75
**Tableau 3.2**- Ecart-types et coefficients de variation de la puissance spécifique au cours de séchage MOAC pour le mode 1 de la stratégie 2 ..... 81
**Tableau 3.3**- Ecart-types et coefficients de variation de la puissance spécifique au cours du séchage MOAC pour le mode 2 de la stratégie 2 ..... 83
**Tableau 3.4**- Comparaison des paramètres de la couleur entre le séchage MOAC en pilotage continu et par intermittence ..... 107
**Tableau 3.5**- Valeurs des diffusivités apparentes ($D_{ap}$) obtenues pour la demi-tomate à différentes conditions de séchage MOAC avec pilotage de la Ps en continu chaque sec. . 113
**Tableau 3.6**- Résultats statistiques des différents modèles de séchage MOAC (30°C) de la demi-tomate avec pilotage continu de la puissance spécifique (Ps) chaque seconde. ..... 118
**Tableau 3.7**- Résultats statistiques des différents modèles de séchage MOAC (40°C) de la demi-tomate avec pilotage continu de la puissance spécifique (Ps) chaque seconde ..... 119
**Tableau 3.8**- Résultats statistiques des différents modèles de séchage MOAC (50°C) de la demi-tomate avec pilotage continu de la puissance spécifique (Ps) chaque seconde. ..... 120
**Tableau 3.9**- Valeurs observées des réponses du plan de Doelert liées au procédé de séchage MOAC. ..... 123
**Tableau 3.10**- Valeur des réponses du plan de Doehlert liées à la qualité du produit séché par MOAC. ..... 124
**Tableau 3.11**- Coefficients des modèles et leur p-value obtenus par analyse de la variance pour les différentes réponses relatives au process microondes ..... 124
**Tableau 3.12**- Analyse de la variance et coefficients pour la prédiction des modèles relatifs aux paramètres qualité ..... 127

**Tableau 3.13**- ANOVA pour le modèle quadratique développé pour la DS ..... 130
**Tableau 3.14**- ANOVA pour le modèle quadratique développé pour la CEM ..... 130
**Tableau 3.15**- ANOVA pour les modèles quadratiques développés pour les réponses relatives à la qualité de la tomate séchée par MOAC..... 131
**Tableau 3.16**- Désirabilité et poids affecté aux différentes réponses ..... 132
**Tableau 3.17**- Conditions optimales pour le séchage MOAC de la tomate. ..... 139
**Tableau 3.18** - Présentation des interactions logiques (et les surfaces de réponses correspondantes), intervenant dans le modèle de la fermeté (Ferm) ..... 143
**Tableau 3.19**- Quelques interactions logiques et leur surface de réponse ..... 144
**Tableau 3.20**- Conditions optimales déterminées avec le logiciel CORICO ..... 145
**Tableau 3.21**- Comparaison des rapports F des méthodes d'optimisation Classique et CORICO ..... 151

## INTRODUCTION GENERALE

La tomate (*Solanum Lycopersicum L.*) est l'un des fruits et légumes le plus cultivé au monde pour son utilisation dans de nombreux mets. C'est aussi un produit agricole riche en éléments nutritifs, notamment le lycopène, dont des études épidémiologiques ont montré qu'il pourrait lutter contre l'apparition de certaines maladies dégénératives telles que le cancer de la prostate (**Giovannucci *et al.***, 1995; **Cao, Sofic, & Prior**, 1997 ; **Liu *et al.***, 2000). Cependant ce légume est très rapidement périssable, d'où l'utilisation de techniques de conservation pour la préservation de ses éléments nutritifs.

Le séchage est l'un des moyens couramment utilisé pour la préservation des aliments en général et des fruits et légumes en particuliers. Plusieurs méthodes de séchage existent, entre autres le séchage par microondes qui est efficace en énergie et en temps et peut, dans certains cas, améliorer la préservation de la qualité du produit (**Li, Raghavan, & Orsat**, 2010a). Cette méthode peut être combinée au séchage à air chaud, au séchage sous vide et à la lyophilisation etc…, ce qui a été mis en pratique dans de nombreux cas de séchage cette dernière décennie (**Orsat, Changrue, & Raghavan**, 2006; **Raghavan, Orsat, & Meda**, 2005; **Vadivambal & Jayas**, 2007; **Zhang *et al.***, 2006).

Dans une application de séchage par microondes typique, une puissance microondes fixe est appliquée durant tout le processus de séchage sans qu'aucune régulation de la puissance ou de la température ne soit réalisée. Avec cette configuration, si les effets de la puissance sur le produit sont acceptables en période 1 (mise en température) et en période 2 (élimination de l'eau libre) (**Lu, Tang, & Ran**, 1999) une certaine carbonisation peut apparaître dans la dernière période car la température du produit peut atteindre localement une valeur indésirablement élevée et entraîner la dégradation de la qualité du produit sec.

En effet, au cours du séchage microondes des produits agricoles, la température de l'air et la puissance des microondes sont les deux facteurs les plus importants. Ces deux facteurs influencent significativement les paramètres du séchage tels que le temps de séchage, la cinétique de séchage, l'efficacité du séchage et la qualité du produit fini. Pour améliorer le séchage par microondes, un certain nombre d'études ont été entreprises afin d'examiner les effets de la puissance microondes appliquée, de la température de l'air de séchage et différents modèles de prévision ont été établis (**Adedeji, Ngadi, & Raghavan**, 2009 ; **Andres, Bilbao, & Fito**, 2004 **; Changrue, Orsat, & Raghavan,** 2008 **; Cui *et al.***, 2005 **; Clary, Wang, & Petrucci**, 2005 **; Lu, Tang, & Ran**, 1999).

Il s'en suit que pour améliorer le résultat du séchage microondes, la puissance appliquée au produit, doit être maîtrisée tout au long du processus ainsi que sa température. Cette maîtrise passe par la régulation de la puissance spécifique (puissance rapportée à la masse résiduelle du produit), particulièrement à la dernière étape de séchage. Peu d'études portant sur ces considérations sont rapportées dans la littérature (**Li, Raghavan, & Wang**, 2010), bien que leur intérêt ait été souligné par quelques chercheurs (**Clary, Wang, & Petrucci**, 2005; **Zhang *et al.***, 2006). La raison pourrait en être le coût élevé de la mesure de la température

interne du produit (coût très élevée d'une fibre optique) et le manque de commodités de la régulation de la température et de la puissance notamment.
Pour pallier ce problème, un nouveau système de séchage microondes a été développé dans cette étude. Ce dispositif autorise une régulation de la puissance appliquée à partir de la masse de l'échantillon.
L'objectif de cette étude est de développer des stratégies de séchage microondes air chaud (MOAC) incluant la régulation de la puissance spécifique afin d'améliorer la qualité de la tomate tout en limitant la consommation énergétique au plus près du nécessaire. Pour atteindre cet objectif principal, notre travail de thèse se propose d'atteindre les objectifs spécifiques suivant:

- la régulation effective de la puissance spécifique en vue de maîtriser la température du produit dans la phase finale du séchage,
- la comparaison de deux stratégies d'adaptation de la puissance spécifique (chaque seconde ou toutes les 5 minutes) pour déterminer celle qui permet de mieux préserver la qualité du produit tout en limitant la consommation énergétique,
- la modélisation semi-empirique de l'évolution de l'humidité de la demi-tomate au cours du séchage MOAC avec pilotage de la puissance spécifique en vue de prédire le comportement au séchage ce celle-ci,
- l'optimisation du procédé de séchage MOAC en termes de qualité de la tomate séchée.

Ainsi, la première partie de ce rapport est consacrée à une synthèse bibliographique sur des généralités sur la tomate et le séchage microondes (MO) puis son pilotage. Dans ce chapitre, nous traitons des caractéristiques nutritionnelles de la tomate et leurs devenirs potentiels lorsque la tomate est soumise à des traitements thermiques. Ensuite le séchage microondes est caractérisé en mettant l'accent sur le mécanisme de chauffage des microondes et les paramètres qui influencent ce type de séchage. Enfin nous exposons les différentes techniques de pilotage du séchage microondes de la littérature, avant de présenter les différents modèles utilisés lors de ces études pour prédire le comportement du produit.
La seconde partie de ce rapport, est dédié aux matériels et méthodes où nous présentons d'abord les appareils utilisés pour les différentes mesures avant d'exposer les différentes méthodes mises en œuvre pour atteindre les objectifs de l'étude.
Dans la troisième partie, les résultats de l'étude sont présentés : d'abord sur la mise en œuvre de l'adaptation de la puissance microondes appliquée chaque seconde, qui permet d'obtenir des tomates séchées de meilleure qualité que celle de deux tomates séchées commerciales (obtenues par séchage solaire); puis sur l'étude comparative des stratégies de séchage MOAC avec pilotage de la puissance spécifique à deux fréquences. Nous poursuivons ensuite avec les résultats des 6 modèles de séchage (de la littérature) testés; enfin les résultats d'une optimisation entreprise pour obtenir les conditions optimales en puissance spécifique, en fréquence de la régulation et en température d'air sont présentés. Pour terminer un bilan sur les résultats obtenus au cours de notre travail de thèse et les perspectives pour la suite de l'étude sont exposés.

# 1ère partie : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

## 1ère Partie : Sommaire

I.1- GENERALITES SUR LA TOMATE……5

I.1.1-INTRODUCTION……5

I.1.2- TOMATE : PRODUCTION ET CARACTERISTIQUES……5

I.1.3- QUALITE DE LA TOMATE SECHEE……10

I.2- GENERALITES SUR LE SECHAGE PAR MICROONDES……16

I.2.1- INTRODUCTION……16

I.2.2- QUELQUES RAPPELS SUR LE SECHAGE……16

I.2.3- SECHAGE PAR MICROONDES……21

I.2.4- TECHNOLOGIES DE SECHAGE COMBINEES AUX MICROONDES……29

I.3- PILOTAGE ET MODELISATION DU SECHAGE MICROONDES……32

I.3.1- INTRODUCTION……32

I.3.2- PILOTAGE DU SECHAGE MICROONDES……32

I.3.3- MODELISATION DU SECHAGE MICROONDES COMBINE A L'AIR CHAUD…..35

I.4- SYNTHESE ET CONCLUSION……40

# I.1- GENERALITES SUR LA TOMATE

## I.1.1-INTRODUCTION

Ce chapitre a pour but de faire une présentation générale de la tomate et montrer l'importance de sa production dans le monde et en particuliers en Côte d'Ivoire où ce fruit-légume est utilisé dans une majorité de mets locaux. Par ailleurs, nous abordons dans un second temps la composition chimique de la tomate afin de mieux appréhender les enjeux liés à la préservation de la qualité de la tomate au cours d'un procédé de transformation. En ce sens, un intérêt particulier est porté au lycopène qui constitue l'indicateur chimique de qualité analysé dans cette étude.

## I.1.2- TOMATE : PRODUCTION ET CARACTERISTIQUES

### I.1.2.1- PRODUCTION DE LA TOMATE

La production mondiale de tomate progresse régulièrement en passant de 64 millions de tonnes en 1988 à plus de 100 millions en 2009. Une estimation de la production transformée est évaluée à 30 %. Au niveau mondial, la consommation par personne ne cesse d'augmenter, et celle de la France, en tomates fraîches, est de l'ordre de 13 kg par personne et par an, et cette consommation a tendance à augmenter en dehors de la période estivale. La consommation sous forme de produits transformés atteint 22 kg en équivalent tomates fraîches (**Mathey & Baissard**, 2009).

En Côte d'Ivoire, ces dix dernières années, la production de tomates a connu une baisse de plus de 50 %, passant de 320 000 tonnes à 150 000 tonnes, selon les groupements de producteurs (**Zamblé**, 2010). Cette chute est due d'abord au flétrissement bactérien (maladie liée à la composition de la terre) et ensuite à l'abandon de la culture par des producteurs du fait du retard des pluies et de la forte concurrence de la tomate importée du Burkina Faso, du Mali et d'Europe. Depuis 2009, avec l'adoption de la culture hors sol par près de 200 producteurs, la production a connu une hausse d'environ 50 %, soit près de 225 000 tonnes en 2010 (**Zamblé**, 2010). Le pays compte quelque 3.000 producteurs de tomates répartis sur l'ensemble du territoire du nord au sud et d'est en ouest et cultivant plusieurs variétés dont les semis proviennent des sociétés semencières françaises.

Cette production de tomate prisée par les producteurs ivoiriens gagnerait à être transformée pour remédier à sa rapide péremption sous les tropiques tout en conservant ces propriétés nutritionnelles (**Zamblé**, 2010).

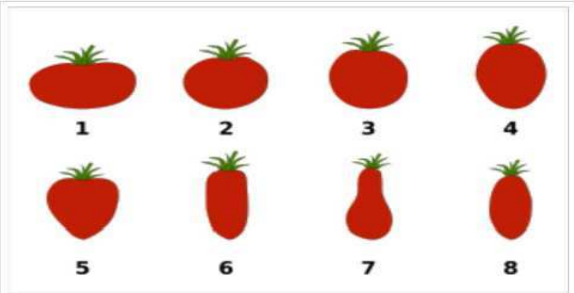
### I.1.2.2- VARIETES DE TOMATE

La tomate, de son nom scientifique *Solanum lycopersicum L.,* est originaire du nord ouest de l'Amérique du Sud. Elle est introduite à partir du XVIè siècle en Europe à partir des jardins sévillans en Espagne (**Zidani**, 2009). La tomate est une plante herbacée sensible au froid, vivace sous climat chaud, généralement cultivée comme annuelle. C'est une plante à croissance indéterminée, mais il existe des variétés à croissance déterminée, c'est-à-dire dont la fonction végétative s'arrête précocement (**Zidani**, 2009). Cultivée dans les pays chauds et tempérés du monde entier, la tomate est constituée de deux grandes variétés botaniques que sont (**IPGRI**, 2009):

- ✓ *Solanum lycopersicum esculentum* à gros fruits, c'est la tomate cultivée de laquelle découlent presque toutes les variétés ou cultivars trouvées sur le marché ;
- ✓ *Solanum lycopersicum cerasiforme*, ou la tomate cerise, c'est la seule forme sauvage du genre rencontrée en dehors de l'Amérique du Sud;

Il existe de nombreuses variétés des *lycopersicon esculentum* avec une sélection particulière réservée aux plantes à gros fruits. En général, les variétés de tomate sont classées en fonction de leur forme (figure 1.1), ainsi l'on dénombre :

- les variétés à fruit plat et côtelé, de type *tomate de Marmande*, avec un poids élevé dépassant 1 kg;
- les variétés à fruit arrondi, dont le poids varie de 100 à 300 g, avec existence de variétés hybrides dont les fruits se conservent plus longtemps ;
- les variétés à fruit allongé avec une extrémité arrondie (de type *Roma*) ou pointue (de type Chico). En général, ces dernières variétés sont destinées à l'industrie, car elles répondent à un certain nombre de critères technologiques liés à leur transformation ;
- les variétés à petits fruits : tomate cerise, cocktail ;
- les variétés de diversification : de formes et de couleurs variées.




Principales formes de tomates : 1. aplatie - 2. légèrement aplatie - 3. arrondie - 4. haute et ronde - 5. en forme de cœur - 6. cylindrique - 7. en forme de poire - 8. en forme de prune

**Figure 1.1-** *Variétés de tomate classées selon la forme* (source **:** (**IPGRI**, 2009)

En général, dans le commerce ce sont les variétés de forme cylindrique (6) ou en forme de prune (8) qui sont utilisées pour le séchage. Cependant dans notre étude nous avons utilisé les variétés de forme arrondie (3) qui sont les plus présentes en Côte d'Ivoire.

#### I.1.2.3- COMPOSITION BIOCHIMIQUE DE LA TOMATE

Biochimiquement, la composition de la tomate fraîche dépend de plusieurs facteurs, que sont: la variété, l'état de maturation, la lumière, la température, la saison, le sol, l'irrigation et les pratiques culturales **(Salunkhe, Bolin, & Reddy**, 1974).

#### I.1.2.3.1- Constituants majeurs

Contrairement à la plupart des fruits, la tomate est un aliment très peu énergétique, car prise crue, elle n'apporte qu'environ 15 kcal/100 g et 20 kcal/100 g à l'état cuit. La tomate comme la plupart des légumes, présente une bonne densité nutritionnelle[1] avec : 94% d'eau et 6% de matière sèche composée de 50% de sucres (fructose et glucose), 25% d'acides organiques (acides citriques et maliques), 8% de minéraux, 2% d'acides aminés, de caroténoïdes et autres métabolites secondaires, c'est aussi une source de fibres (2 g /100g) soit le quart des apports nutritionnels conseillés (**Davies & Hobson**, 1981).

#### I.1.2.3.2- Constituants mineurs

La tomate contient de nombreux minéraux et oligoéléments et comme la plupart des fruits et légumes, elle apporte beaucoup de potassium (245,0 mg/ 100g) ce qui fait d'elle une source appréciable de cet important minéral. Elle peut fournir également 50 à 160 mg de vitamine C et 22,5 à 90 mg de vitamine E. Parmi les phyto-constituants, elle contient des polyphénols (l'acide férulique, l'acide chlorogénique, l'acide caféique), (**Beecher**, 1998) des flavonoïdes (la quercitrine, le kaempférol, la rutine et la naringénine), et des caroténoïdes, en particulier le lycopène dont les teneurs varient (Tableau 1.1) en fonction du type de produit fabriqué (**Markovic, Hruskar, & Vahcic**, 2006).

[1] La densité nutritionnelle d'un aliment correspond à son contenu en micronutriments indispensables à la santé (vitamines, minéraux…) rapporté au nombre de calories qu'il contient. Lorsque la teneur en micronutriments (vitamines, minéraux…) est élevée et que l'apport énergétique est faible, on dit que la densité nutritionnelle est élevée. C'est notamment le cas des fruits et légumes, mais aussi des produits céréaliers, poissons, et de certaines viandes et certains produits laitiers **(Poisson, De la Porte , & Rio** , 2009).

**Tableau 1.1-***Teneur en lycopène dans les tomates fraiches et dans différents produits à base de tomate consommés* ( **Markovic, Hruskar, & Vahcic,** 2006).

| Tomate et produits à base de tomate | Lycopène (mg/100 g de produit) | |
|---|---|---|
| | ***Gamme*** | ***Moyenne ± E.T.*** |
| Tomate (fraîche) | 1,8 - 11,2 | 5,3 ± 2,4 |
| Purée de tomate | 5,6 – 16,9 | 10,2 ± 3,2 |
| Ketchup | 5,1 – 25,0 | 8,1 ± 5,8 |
| Pate de tomate | 3,8 – 49,5 | 25,2 ± 14,9 |
| Jus de tomate | 6,9– 42,7 | 20,1 ± 13,8 |
| Conserve de tomate entière | 5,9 – 42,1 | 17,0 ± 14,4 |

On remarque que la teneur en lycopène augmente dans la tomate transformée par rapport à la tomate fraîche. Ces teneurs étant exprimées en base humide et non en base sèche, il est difficile de conclure quant aux teneurs données pour la purée de tomate, le ketchup et la pâte de tomate par rapport à la tomate fraîche. En revanche, on peut penser que le jus et la conserve de tomate entière ont des teneurs en eau proches de celle de la tomate fraîche. Donc, pour au moins ces deux produits transformés on aurait une confirmation de la thèse selon laquelle le lycopène serait enfermé dans les cellules de la tomate fraîche et se libérerait lors des processus de transformation physique intervenant notamment lors d'un traitement thermique et singulièrement d'un traitement micro-onde.

### I.1.2.3.3- Antioxydants de la tomate

Les études d'intervention (ou épidémiologique) visant à montrer qu'une alimentation riche en fruits et légumes ayant une incidence positive sur les taux plasmatiques en antioxydants, sont très diversifiées et surtout concluantes. L'ensemble des études épidémiologiques dans diverses régions du globe montre indéniablement que la consommation de fruits et légumes entraine une augmentation significative de la concentration plasmatique en antioxydants, dont la vitamine C et divers caroténoïdes comme l'α- et le β-carotène, la lutéine et le lycopène (**Le Marchand *et al.,*** 1994 ; **Steptoe *et al.***, 2003). Ainsi, il a été montré que la consommation de trois à huit portions de fruits et légumes par jour permet, après deux semaines, d'augmenter significativement la concentration plasmatique en vitamine C et en β-carotène de 72,8 et 53 %, respectivement (**Zino**, **et *al.,*** 1997). Par ailleurs, dans une étude récente, il a été montré que la non consommation de fruits et légumes conduit à la diminution des taux sériques en vitamine C

de l'ordre de 3,55 µg/mL et d'autres antioxydants, constituant de ce fait, un risque majeur pour l'incidence des maladies cardiovasculaires (**Fred Gey**, 1998). Le tableau 1.2 récapitule les principaux antioxydants et l'activité antioxydante des différentes fractions de la tomate.

**Tableau 1.2-** *Principaux antioxydants et l'activité antioxydante des différentes fractions de la tomate* (**Toor & Savage,** 2005) .

| Fraction | Polyphénols totaux (mg eq. ac. gallique/100 g) | | Flavonoïdes (mg eq rutine /100 g) | Lycopène (mg/100 g) | Acide ascorbique (mg/100 g) | Activité antioxydante (µM [2]TEAC/100 g) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Hydrophile | Lipophile | | | | Hydrophile | Lipophile |
| **Pelure** | 29,1 | 5,6 | 20,4 | 8,7 | 16,9 | 212,6 | 18,5 |
| **Purée** | 12,7 | 2,3 | 8,2 | 2,8 | 8,9 | 81,8 | 7,0 |
| **Graines** | 22,0 | 3,5 | 12,1 | 1,6 | 8,4 | 114,0 | 9,4 |

Le tableau 1.2 montre que la majeure partie des antioxydants se localise dans la pelure, d'où l'importance du séchage de la tomate avec la peau.

### I.1.2.3.4- Lycopène

Le lycopène est le caroténoïde prédominant de la tomate avec un taux de plus de 95% (**Tonucci *et al.,*** 1995). Le lycopène, principal colorant responsable de la couleur rouge-foncé caractéristique des fruits mûrs de tomate et des produits de tomate, a suscité beaucoup d'attention ces dernières années en raison de son effet bénéfique dans la prévention de certaines pathologies (**Markovic, Hruskar, & Vahcic**, 2006). Des études épidémiologiques ont montrés que le lycopène pourrait prévenir contre certaines maladies chroniques telles que le cancer de la prostate, le cancer du sang (leucémie), le cancer du tube digestif, le cancer du col de l'utérus, l'infarctus du myocarde et les accidents vasculaires cérébraux (AVC) **(Rao & Agarwal**, 1999). Selon (**Bhuvaneswari & Nagini**, 2005), la forte consommation de tomates diminue efficacement le risque de maladies cardiovasculaires et le cancer par l'amélioration de la capacité antioxydante du corps.

En raison de sa structure (figure 1.2), le lycopène est l'anti radicaux libre le plus efficace, particulièrement contre les espèces radicalaires oxygénées (**Conn, Schalch, & Truscott,** 1991). Le lycopène est un caroténoïde acyclique à chaines ouvertes avec 13 doubles liaisons dont

[2] TEAC = Capacité Antioxydante Equivalent Trolox, est la mesure de la force antioxydante d'une substance donnée par rapport à la norme Trolox. Trolox est le nom commercial de l'acide 6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylique, un dérivé hydrosoluble de la Vitamine E.

11 sont conjuguées et disposées linéairement faisant de lui, le plus long caroténoïde de formule moléculaire est $C_{40}H_{56}$ (PM 536).

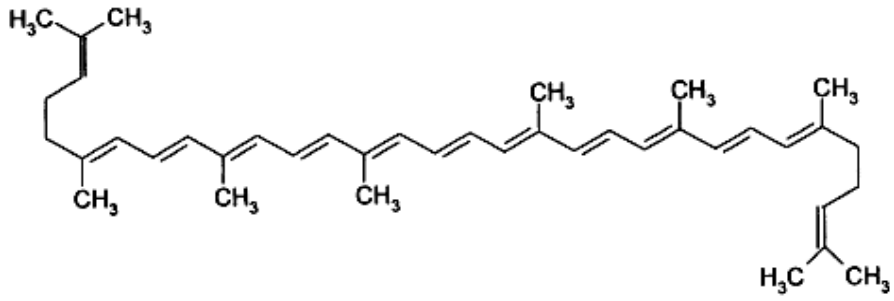


**Figure 1.2-** *Structure moléculaire du lycopène* (**Stahl *et al.,*** 2000)

Molécule non saturée, elle exerce son action en cédant ses électrons afin de neutraliser les radicaux libres responsables de la dégradation des cellules.
Dans la tomate, le lycopène se trouve sous sa forme *all-trans* qui est sa configuration la plus thermostable dans la nature (**Boumendjel, Boutebba, & Houhamdi**, 2002; **Agarwal & Rao**, 2000). Dans le corps humain, il est présent à 50% sous sa forme *cis,* où il exerce une activité antioxydante 10 fois plus élevée que celle de l'alpha-tocophérol (**Stahl & Sies**, 1996).
Le lycopène se trouve principalement dans la peau et le péricarpe de la tomate. Son dosage donne une indication sur un critère de qualité des pâtes de tomate qui est la couleur. La détermination du taux de lycopène peut se faire à l'aide d'un spectrophotomètre à 502 nm ( **Boumendjel, Boutebba, & Houhamdi**, 2002), longueur d'onde à laquelle le lycopène absorbe à 90% (**Grolier**, 1999).

## I.1.3- QUALITE DE LA TOMATE SECHEE

Le séchage est l'une des plus vieilles méthodes utilisées pour la préservation des aliments. Dans le cas des fruits et légumes en général et celui de la tomate en particulier les méthodes de séchage les plus répandues sont le séchage au soleil et le séchage à l'air chaud (ou classique). Aujourd'hui avec l'avancée de la technologie, les microondes font parties des nouvelles techniques de séchage. Plusieurs firmes industrielles appliquent ce type de séchage pour proposer des produits séchés de meilleure qualité (**Lombraña, Rodríguez, & Ruiz**, 2010).

### I.1.3.1- NORMES EUROPEENNES REQUISES POUR LA TOMATE SECHEE

Les qualités physiques de la tomate sont notablement différentes en fonction du taux d'humidité après séchage, aussi la Commission Economique des Nations Unies pour l'Europe a-t-elle définie une norme dénommée « norme CEE-ONU DDP-19 : Ed-2007 » (**CEE-ONU**, 2007). Elle

concerne la commercialisation et le contrôle de la qualité commerciale des tomates séchées et est résumée dans le tableau 1.3.

**Tableau 1.3-** *Norme internationale relative aux teneurs en eau des tomates séchées* (**CEE-ONU,** 2007)**.**

| Teneur en eau des tomates séchées | | | |
|---|---|---|---|
| Désignation de la teneur en eau | Minimale | Maximale | Texture |
| Elevée | 25% | 50% | Souple et pliable |
| Habituelle | 18% | 25% | Ferme mais pliable |
| Amoindrie | 12% | 18% | Très ferme |
| Faible | 6% | 12% | Dure et cassante |

Ce tableau montre que les tomates séchées se désignent différemment en fonction de leur teneur en eau et que leur texture varie en fonction de cette teneur en eau.

#### I.1.3.2- CARACTERISTIQUES DES TOMATES COMMERCIALES SECHEES

La majeure partie des tomates séchées rencontrées dans le commerce est obtenue par le séchage solaire et parfois conventionnel (convectif forcé). En solaire, le séchage est réalisé soit à l'air libre de façon traditionnelle, soit sous serre de façon directe, soit de façon indirecte où l'air est chauffé par un capteur distinct de l'enceinte de séchage.

1- En général le séchage solaire est caractérisé par les conditions opératoires suivantes (**Rozis**, 1995):

- température moyenne ambiante comprise entre 35 et 45 °C,
- humidité relative (minima/maxima) moyenne comprise entre 35 et 80 %.

Des études menées par (**Sacilik, Keskin, & Elicin,** 2006), sur le séchage solaire en tunnel de la tomate organique, indique que la température de séchage est comprise entre 22 et 35 °C avec une humidité relative variant de 15 et 51%.

Des températures comprises entre 45,5 et 55,5 °C (qui conviennent pour sécher la plupart des produits agricoles) ont été utilisées pour réaliser des essais de séchage solaire à capteur sur des fruits sphériques, tels que les raisins, les asperges, les figues et les pommes, ainsi que des légumes, tels que les pois, les tomates et les oignons (**El-Sebaii *et al.***, 2002).

- la durée du séchage est autour de 60 à 72 heures.

En général la tomate séchée au soleil, compte tenu de son long temps d'exposition, voit sa qualité nutritionnelle fortement dégradée.

2- Pour le séchage à l'air convectif forcé, quelques conditions opératoires sont variables et sont les suivantes (**Doymaz**, 2007):

- les températures moyennes utilisées sont dans la gamme de 50 à 70°C avec une vitesse de l'air de 1,5 m/s.

3- Pour le séchage à l'air libre, au centre de la Côte d'Ivoire, les conditions moyennes habituellement rencontrées sont les suivantes (**Djedjro**, 2009) :

- température 30,76 ± 3,63 °C, humidité relative de l'air 66,23 ±5,5 %, vitesse de l'air 0,97 ± 0,18 m/s.

#### I.1.3.3-EFFET DU TRAITEMENT THERMIQUE SUR LA QUALITE DE LA TOMATE

##### I.1.3.3.1- Effet sur la couleur

Le traitement thermique est l'une des méthodes les plus importantes utilisées pour la préservation des aliments. Il est principalement destiné à la l'inactivation des enzymes, à l'élimination des microorganismes causant la détérioration, à la réduction de l'activité de l'eau et à la déshydratation. Toutefois, au cours du traitement thermique, le produit alimentaire peut être exposé à des températures qui ont un effet négatif sur sa qualité, entrainant notamment la détérioration de sa couleur d'origine (**Lozano & Ibarz**, 1997 ; **Ãvila & Silva**, 1999 ; **Ibarz, Pagán, & Garza,** 1999). C'est le cas de la tomate où de nombreuses réactions peuvent avoir lieu lors du traitement thermique et affecter sa couleur. Parmi elles, les plus connues sont la dégradation des pigments, telles que les caroténoïdes en particulier (lycopène, xanthophylle, etc) et de la chlorophylle, et les réactions de brunissement tels que la réaction de Maillard et l'oxydation de l'acide ascorbique (**Barreiro, Milano, & Sandoval**, 1997). En effet, pour les produits à base de tomate, on assiste à une importante réaction de dégradation du lycopène (caractéristique du pigment rouge). Ce dernier est à l'origine sous sa forme *trans*, puis au cours du chauffage va s'isomériser en sa structure *cis*, entrainant ainsi des changements de couleur. La dégradation de la couleur au cours du chauffage des produits de la tomate implique en réalité une série de réactions complexes dont les mécanismes et modes d'action ne sont actuellement pas complètement bien maîtrisés. Des études sur les paramètres $L^*a^*b^*$ (caractéristiques de la couleur) des produits de la tomate montrent une cinétique d'évolution de chacune d'elles au cours du temps et en fonction de la température de traitement appliquée. Plus la température est élevée plus le changement de la couleur est importante (**Rodrigo, van Loey, & Hendrickx**, 2007 ; **Barreiro, Milano, & Sandoval**, 1997; **Rajchl *et al.*,** 2010).

### I.1.3.3.2- Effet sur la texture

La texture est un indicateur majeur de la qualité de fruits et légumes. Elle est significativement affectée lors des traitements thermiques, principalement en raison de la dépolymérisation bêta qui élimine les polysaccharides pectiques de la paroi cellulaire (**Sila *et al.,*** 2006). Cette dépolymérisation conduit à la solubilisation de la pectine et par conséquent, à une diminution de l'adhésion intercellulaire qui conduit à un ramollissement des tissus. La vitesse de réaction est fortement lié au pH, au degré de la méthyl-estérification de la pectine et à la présence d'ions (**Keijbets & Pilnik,** 1974; **Sajjaanantakul, Van Buren, & Downing**, 1993). Ce ramollissement des tissus facilite la perte en eau du produit suite à éclatement intracellulaire. Ainsi les groupements carboxyliques non-métoxylés peuvent être réticulés par des ions de calcium naturellement présent dans le tissu ou exogène, augmentant donc l'adhésion intercellulaire, ce qui rend le produit plus ferme en fin de traitement.

L'amélioration de la texture des produits agro-alimentaires traités thermiquement a été abordée de diverses façons. Une des stratégies mise en place est de rendre les tissus du produit agricole moins vulnérable à la réaction de bêta-élimination survenant au cours du chauffage. Ceci peut être réalisé en réduisant le degré d'estérification de la pectine, par application d'un traitement thermique préalable, ou Haute Pression (HP) qui stimule l'activité de l'enzyme pectine méthylestérase (PME) (**De Roeck *et al.,*** 2010).

Des études menées par (**Nijhuis *et al.,*** 1998) ont montré que, lors du chauffage par microondes, le transfert de masse peut endommager la qualité physique ou provoquer des changements indésirables dans le produit. Les études de texture réalisées sur la peau et la pulpe de tomate concernent la fermeté notamment la force de pénétration maximale de la tomate.

### I.1.3.3.3- Effet sur la structure

La *microscopie électronique à balayage* (MEB ou SEM pour *Scanning Electron Microscopy* en anglais) est une technique de microscopie électronique basée sur le principe des interactions électrons-matière, capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon. La MEB est une méthode utilisée pour l'analyse de la qualité des échantillons déshydratés, notamment l'étude des changements structuraux des cellules avant et après séchage **(Tu, Nicolai, & De Baerdemaeker**, 2000). L'analyse des changements structuraux des produits pendant le séchage est d'intérêt pour deux raisons : la prise en compte des aspects qualité et la cinétique de séchage. La structure finale des produits séchés est le résultat de l'effet de l'intensité du flux d'eau sortant, du flux thermique et du gradient de température et de pression de vapeur d'eau interne. Ainsi la diffusivité de l'eau, pendant le séchage, va dépendre de la structure interne des produits. Une quantité de chaleur transférée élevée conduit habituellement à des effets défavorables sur la qualité du produit, si elle n'est pas corrigée par

un gradient de température inverse favorable, caractéristique du chauffage par microondes (**Lombraña, Rodríguez, & Ruiz,** 2010). Rares sont les études réalisées sur la structure de la tomate séchée par microondes. L'essentiel des études concerne le séchage microondes sous vide. **Giri & Prasad** (2007) ont étudié l'effet de l'action de l'air et des microondes sous vide sur la structure de champignons séchés. Il en ressort que dans les échantillons séchés à l'air (fig. 1.3 a), il y a moins de structures et pores ouverts que dans les échantillons séchés par microondes sous vide (fig. 1.3 b et c), indiquant le rétrécissement et la dégradation sévère de tissus pendant le séchage à l'air.

Le faible rétrécissement des échantillons séchés par microondes sous vide peut être dû au temps de séchage plus court, à la température de séchage basse et à une certaine expansion de tissu provenant de la pression de vapeur d'eau interne. De plus la structure est plus poreuse pour les échantillons séchés avec le renforcement des conditions sous vide (fig. 1.3 c) lors du séchage micro-onde sous vide.

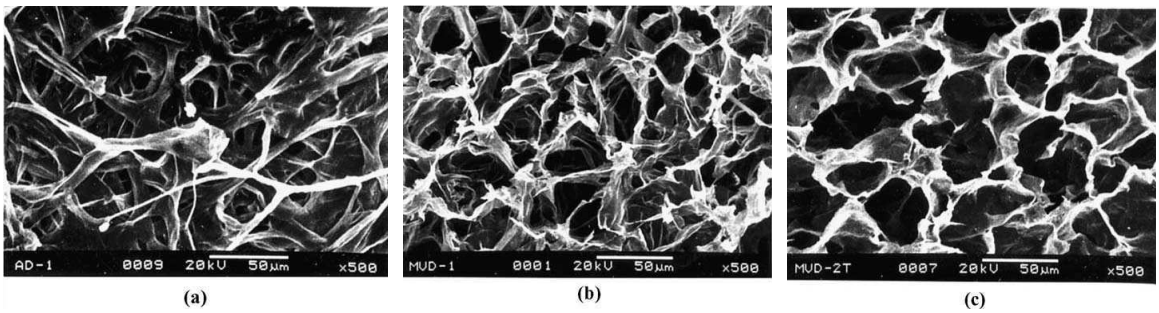



**Figure 1.3-** *Micrographes électroniques de balayage de champignon sec: (a) séché à l'air à 60°C, (b) séché aux microondes sous-vide à la pression de 20 kPa et (c) séché aux microondes sous-vide à 10 kPa.* (**Giri & Prasad,** 2007).

### I.1.3.3.4- Effet sur le lycopène

La tomate et ses produits dérivés sont les principales sources de lycopène. Ils contribuent également à l'apport en caroténoïdes dans l'alimentation humaine. Toutefois, le traitement thermique et le stockage des produits de la tomate entraînent une dégradation du lycopène tels que rapporté par **Nguyen & Schwartz** (1998). La stabilité du lycopène de la tomate durant les traitements thermiques (cuisson, concentration, déshydratation, etc..) pour la fabrication des produits de la tomate ont largement été étudiés. Il ressort que l'ampleur de la dégradation du lycopène observée au cours de ces processus dépend du type de traitement, de la température, de la durée et présence d'oxygène et de la lumière (**Goula & Adamopoulo**s, 2005). Le traitement thermique est supposé en général réduire la teneur en caroténoïdes des produits (**Shi & Le Maguer,** 2000), et en particulier celle du lycopène qui peut subir une dégradation par l'intermédiaire de l'oxydation au cours du stockage et une isomérisation au cours du traitement

thermique (**Chen *et al.,*** 2009). **Boskovic** (1979) a suggéré que la première étape de dégradation serait une isomérisation réversible du lycopène *all-trans* en isomères *cis* plus oxydables et moins coloré. **Lovrić, Sablek, & Bošković** (1970) abondent dans le même sens, en rapportant que la molécule de lycopène se fragmente en de plus petites molécules d'aldéhydes et de cétones volatiles à l'issue de l'auto-oxydation du lycopène *all-trans* et des isomères *cis* survenue parallèlement à l'isomérisation *trans-cis*. Cependant, il faut aussi noter que les facteurs environnementaux que sont la lumière, l'air et la température de l'air peuvent influencer de manière importante l'isomérisation et l'oxydation des produits de la tomate (**Anguelova & Warthesen**, 2000).

Concernant le séchage microondes associé à l'air chaud, les études de (**Heredia *et al.,*** 2010), ont montré que la teneur en lycopène résiduel diminue avec l'augmentation de la puissance microondes (figure 1.4). En effet plus il y a de l'isomérisation *trans-cis* moins il y a du lycopène résiduel. Car la forme *cis* du lycopène est moins stable que la forme *trans*. Or pendant le séchage microondes la génération de chaleur interne s'ajoute à l'externe pour augmenter la température et la vitesse d'évaporation en favorisant l'isomérisation rapide qui apparait, comme le disent certains auteurs (**Mayer-Miebach *et al.,*** 2005 ; **Shi et al.**, 1999), dès le début du traitement, diminuant ainsi le taux résiduel de lycopène.

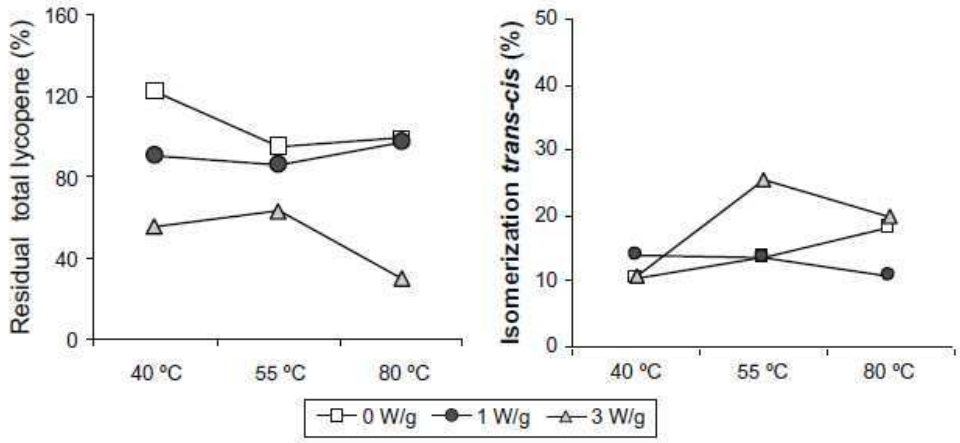



**Figure 1.4-** *Graphe d'interaction température- puissance sur le lycopène total résiduel et le niveau d'isomérisation trans-cis*. (**Heredia *et al.,*** 2010).

On note aussi que l'interaction puissance et température élevée est défavorable au maintien du lycopène dans le produit séché.

En résumé la tomate qui est un fruit-légume produit partout dans le monde est pauvre en colorie mais riche en micronutriments dont le lycopène, un antioxydant pouvant contribuer à lutter efficacement contre certains types de cancer. Toutefois la tomate soumise à des traitements thermiques, pour sa conservation, peut voir ses qualités organoleptique et nutritionnelle se dégrader. D'où l'intérêt d'utiliser un traitement approprié moins dégradant.

# I.2- GENERALITES SUR LE SECHAGE PAR MICROONDES

## I.2.1- INTRODUCTION

Après avoir fait quelques rappels sur le séchage en général nous allons caractériser le séchage par microondes en définissant les grands principes et mécanismes qui le régissent. Ensuite les paramètres qui influencent le séchage par microondes vont être mis en exergue. Et enfin nous décrirons de façon plus spécifique les phénomènes de transfert thermique conduisant notamment à l'apparition des points chauds au cours du séchage microondes.

## I.2.2- QUELQUES RAPPELS SUR LE SECHAGE

### I.2.2.1- DEFINITIONS ET FONCTIONNEMENT

L*e séchage est* par définition *l'opération dont l'objectif est d'éliminer par évaporation l'eau d'un corps humide (solide ou liquide), le produit final obtenu étant toujours un solide.* Cette définition peut être généralisée à l'élimination par évaporation de toute substance volatile d'un mélange (élimination d'un solvant d'extraction d'huile) (**Bimbenet, Duquenoy & Trystram**, 2002).
Dans cette opération deux phénomènes ont lieu : un transfert de chaleur vers le produit pour faciliter la vaporisation de l'eau, et un transfert de matière (en général de l'eau à l'état liquide pour le transfert interne et de la vapeur d'eau pour le transfert externe) du produit vers l'atmosphère environnante. Le plus souvent de l'air chaud est utilisé comme fluide de séchage apportant la chaleur et évacuant l'humidité (**Bimbenet,** 1984).

### I.2.2.2- PRINCIPE PHYSIQUE DU SECHAGE

Pour extraire l'eau d'un produit, deux mécanismes peuvent être mise en œuvre : l'élimination de l'eau par entrainement ou par ébullition (**Bimbenet, Bonazzi, & Dumoulin**, 2002)

#### I.2.2.2.1- Séchage par entrainement

Lorsqu'un corps humide est placé dans un courant d'air (ou dans un autre gaz) suffisamment chaud et sec, il s'établit spontanément entre ce corps et l'air un écart de température et de pression partielle de vapeur d'eau (**Linden & Lorient**, 1994). Il s'ensuit un transfert de chaleur de l'air vers le produit, sous l'effet de l'écart de température et un transfert d'eau en sens inverse du fait de l'écart de pression de vapeur d'eau entre la surface du produit et l'air environnant. Le séchage est dit « isenthalpique » si l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau est exactement égale à celle apportée par l'air chaud (**Daudin**, 1983).

### I.2.2.2.2- Séchage par ébullition

Un séchage par ébullition a lieu lorsque le flux thermique transféré au produit est très intense à cause d'un écart de température très élevé entre la source chaude et le produit (par conduction sur une surface chaude – séchoir cylindre -, par rayonnement –séchoir microondes -, par convection – séchoir à vapeur d'eau surchauffée, par immersion dans de l'huile chaude). Dans toutes ces conditions la température du produit atteint un niveau tel que la pression de vapeur d'eau ($p$) de ce produit est égale ou dépasse à la pression totale ambiante ($p_t$): $p \geq p$ **(Bimbenet & Bonazzi**, 2003).
L'ébullition proprement dite s'observe difficilement dans les solides ou les corps pâteux que dans les liquides (**Perkin**, 1980).

### I.2.2.2.3- Modes d'apport de la chaleur

Durant le séchage, la chaleur est transférée au produit selon trois mécanismes (**Bimbenet, Duquenoy & Trystram**, 2002):

- par conduction : le produit humide est en contact direct avec une surface chaude
- par convection :
  - à partir de la vapeur d'eau surchauffée ou d'un liquide non miscible à la vapeur d'eau. Il s'agit alors d'un séchage par ébullition.
  - à partir d'un gaz vecteur de chaleur. Dans ce cas, le gaz sert aussi de vecteur à la vapeur d'eau. C'est un séchage par entraînement.
- par rayonnement : le produit est exposé à un rayonnement infrarouge ou microondes.

La conduction peut permettre une chauffe rapide du produit quand celui-ci est sous forme de couche mince (cas du séchage sur cylindre). Le plus souvent cependant, les trois mécanismes d'apport de chaleur se combinent les uns aux autres. C'est ainsi, par exemple, que la conduction et le rayonnement peuvent s'ajouter, de façon intentionnelle ou parasitaire, à la convection, dans le cas de séchage par entraînement (**Bimbenet**, 1984) .

### I.2.2.2.4- Périodes du séchage par entrainement

Une opération de séchage se caractérise par la détermination de la variation de la masse en eau et en température du produit en fonction du temps. Ces variations sont dues à un débit d'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau et à un débit de chaleur apporté par l'air selon les équations 1.1 et 1.2 (**Bimbenet, Duquenoy & Trystram**, 2002):

$$\dot{m} \cdot \Delta H_v = A \cdot k_p \cdot (p_s - p) \cdot \Delta H_v = A \cdot k_p \cdot (p'_\theta . a_w - p) \cdot \Delta H_v \qquad (1.1)$$

$$\dot{Q} = A \cdot h(\theta_a - \theta_s) \qquad (1.2)$$

Avec :

$\dot{m}$ : le débit de matière (kg.s$^{-1}$);

$\Delta H_v$ : chaleur latente de vaporisation de l'eau (kJ.kg$^{-1}$) ;

$A$ : surface de contact de l'air avec le produit (m²);

$k_p$ : le coefficient de transfert de matière (kg eau.m$^{-2}$.s$^{-1}$.Pa$^{-1}$);

$p_s$ : pression de vapeur d'eau à la surface du produit (Pa);

$p$ : pression de vapeur d'eau dans l'air (Pa);,

$p'_{\theta s}$ : pression de vapeur saturante à la température de surface du produit (Pa);

$a_{w,s}$ : activité de l'eau à la surface du produit;

$h$ : coefficient de transfert de chaleur convectif (W.m$^{-2}$.K$^{-1}$);

$\theta_a$ : température de l'air (°C);

$\theta_s$ : température à la surface du produit (°C).

Ainsi, dans une opération classique de séchage à l'air chaud d'un produit capillaro-poreux hygroscopique, on distingue 4 périodes (figure 1.5).

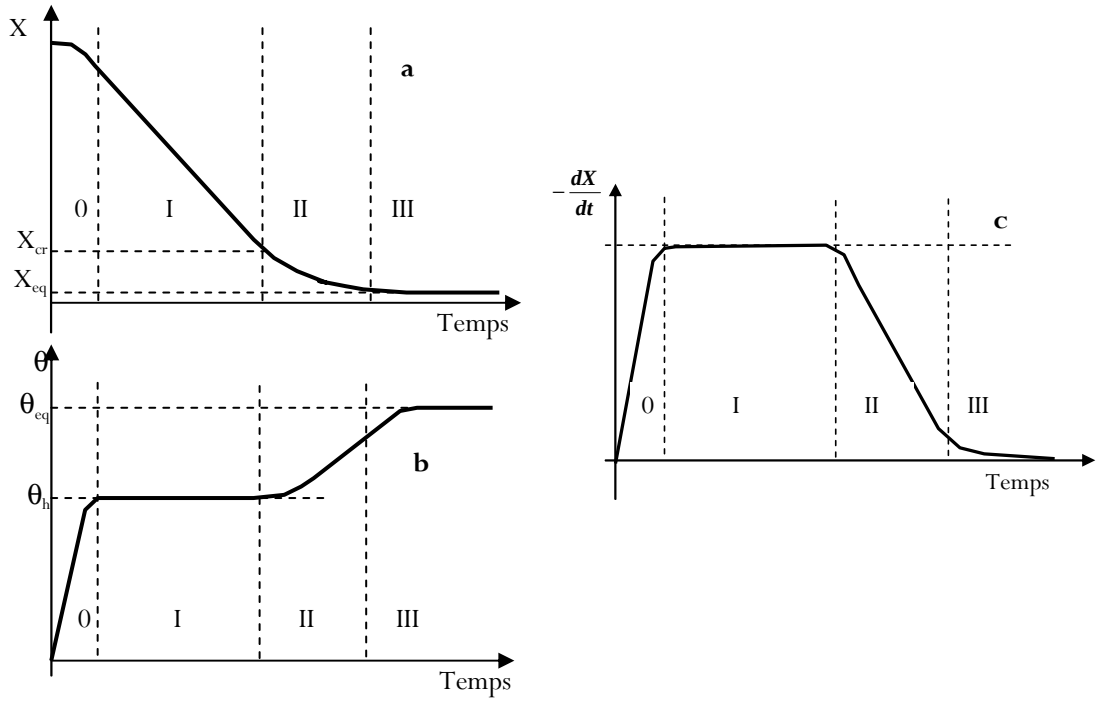



**Figure 1.5 -** *a : Cinétique de séchage à air chaud d'un matériau capillaro-poreux ; b : Evolution de la température d'un matériau capillaro-poreux lors d'un séchage à l'air chaud ; c : Vitesse de séchage d'un matériau capillaro-poreux lors d'un séchage à l'air chaud.*

### Période 0 : période de mise en température

C'est la première phase du séchage généralement de courte durée au regard de la durée totale de l'opération. La teneur en eau diminue peu et la vitesse de séchage augmente progressivement. En effet, le produit entre généralement froid dans le séchoir, sa pression de

vapeur d'eau à la surface, $p_s$, est donc basse, ainsi que sa vitesse d'évaporation de l'eau ou débit massique d'eau ($\dot{m}$).Alors que la différence de température entre l'air et le produit est élevée. Cet écart de température élevé entraîne une augmentation rapide de $p_s$ jusqu'à l'équilibre du bilan d'énergie : c'est la période de mise en température.

### Période I : séchage à vitesse constante

Durant cette période, l'écart entre la pression de vapeur saturante à la surface du produit $p'_{\theta_s}$ et la pression de vapeur de l'air ambiant est constant. C'est écart de pression, dû à un apport de flux de chaleur échangé par convection entre l'air et le matériau, constitue le moteur du transfert de l'eau libre à la surface du produit (figure 1.6). Ainsi, l'activité de l'eau à la surface du produit ($a_{w,s}$) est égale à 1, et l'eau libre est éliminée à flux-masse constant par évaporation à la surface du matériau (**Lecharpentier**, 2000). Cette période existe tant que la surface du matériau est alimentée en eau libre par l'intérieur. A partir de ce qu'on appelle le point de transition ou point critique, on relève une diminution de la vitesse de séchage.

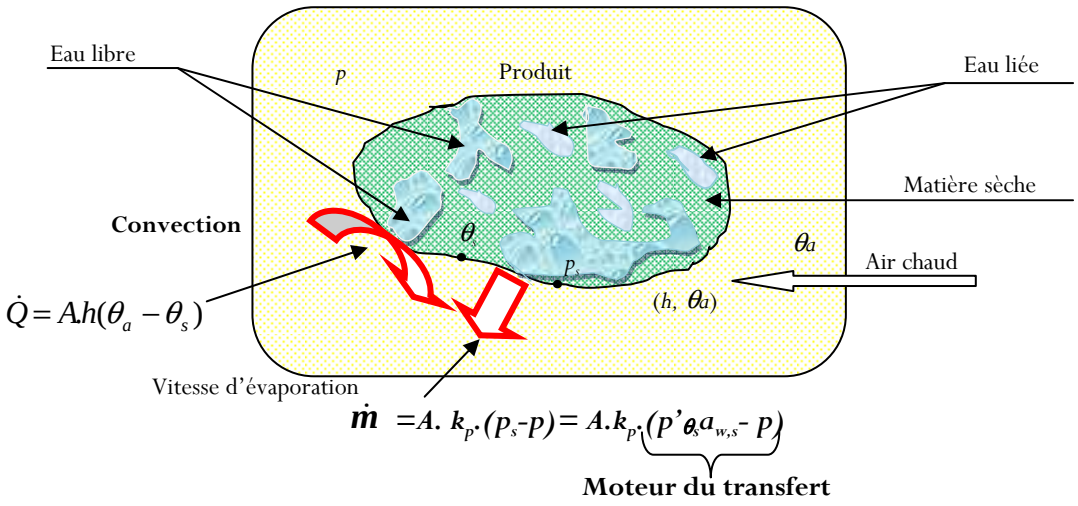



**Figure 1.6-** *Schématisation des transferts pendant la période 1 du séchage par entrainement*

### Période II : phase de ralentissement

L'évaporation ne se produit plus à la surface du matériau mais à l'intérieur. L'activité d'eau en surface $a_{w,s}$ devient inférieur à 1. L'eau qui migre sous forme liquide jusqu'au front d'évaporation transite ensuite vers la surface externe du produit par diffusion de vapeur d'eau à travers une couche de matière sèche (figure 1.7). Cette migration est provoquée par un gradient de vapeur d'eau. Cependant dans le cas des corps hygroscopiques, de l'eau liée subsiste entre le front d'évaporation et la surface. La phase 2 dure tant qu'il y a présence d'eau libre. Pour les

corps non hygroscopique, le séchage s'achève à cette phase. La température et la teneur en eau tendent vers des valeurs d'équilibre ($\theta_{eq}$ et $X_{eq}$) imposées par l'air de séchage (figure 1.5 a - b).

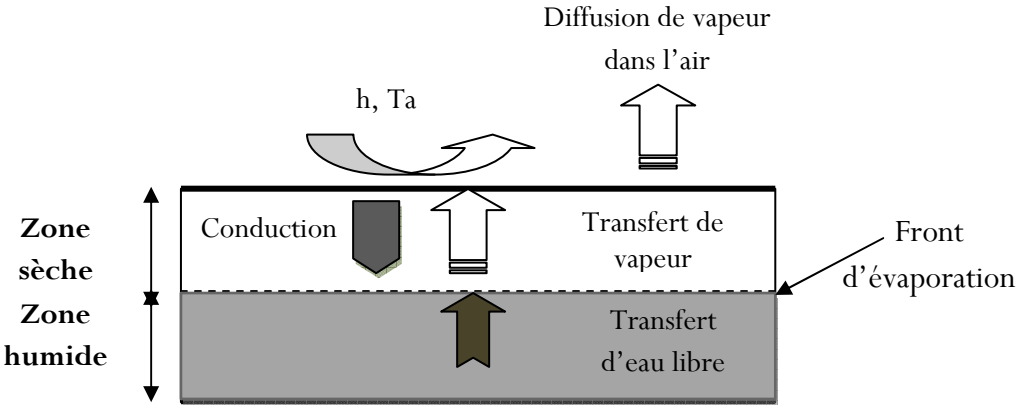



**Figure 1.7-** *Schématisation des transferts pendant la phase 2* (**Lecharpentier,** 2000)

- **Phase III : seconde phase de ralentissement (produits hygroscopiques)**

Pour les matériaux hygroscopiques, on distingue une phase supplémentaire avec un deuxième point critique. Tout le produit est alors dans le domaine hygroscopique (l'eau restante est essentiellement liée). L'extraction de cette eau devient difficile, avec une nouvelle diminution de la vitesse de séchage avant d'atteindre la teneur en eau finale qui correspond à l'équilibre thermodynamique (figure 1.5a) fournie par l'isotherme de sorption.

### I.2.2.2.5- Périodes du séchage par ébullition

Comme le séchage par entraînement, le séchage par ébullition peut se scinder en 3 périodes.

- **Période 0 : période de mise en température**

Lorsque la température du produit est inférieure à la température d'ébullition $\theta_{eb}$ (à pression atmosphérique), toute l'énergie apportée est utilisée pour chauffer le produit jusqu'à la température d'ébullition. C'est donc une phase de mise en température. La teneur en eau diminue peu et la vitesse de séchage augmente progressivement.

- **Période I : Phase d'ébullition**

Durant cette période, le produit est constamment à température $\theta_{eb}$. L'écart entre la pression de vapeur saturante à la surface du produit et la pression de vapeur totale est supérieur ou égale à zéro. L'activité de l'eau ($a_w$) est égale à 1 et l'eau libre est évacuée. La source chaude engendre une augmentation de la température du matériau provoquant l'évaporation de l'eau dans les

pores. Le moteur de ce transfert ici est alors le gradient de température et l'évaporation s'effectue à la surface du matériau selon l'équation:

$$\dot{m}\Delta Hv = A.h(\theta_{ch} - \theta_{eb}) \qquad (1.3)$$

Avec $\theta_{ch}$ la température de la source chaude (°C) (exemple : vapeur surchauffée, plaque chaude) A, la surface de contact entre la source et le produit (m²) et *h*, qui est soit un coefficient d'échange par contact (cas d'un transfert par conduction à partir d'une plaque chaude) ou un coefficient de transfert convectif (cas de la vapeur surchauffée) ($W.m^{-2}.K^{-1}$). Cette période existe tant que la surface du matériau est alimentée en eau libre par l'intérieur. L'allure du transfert de chaleur de la source chaude vers la surface libre du produit à $\theta_{eb}$ , limite la vitesse de séchage (**Bimbenet, Duquenoy & Trystram**, 2002).

- **Période II : phase de ralentissement**

L'activité d'eau en surface devient inférieure à 1, toute l'eau libre est éliminée à la surface du produit. On observe alors un ralentissement de la vitesse de séchage dû à la diminution du gradient de température. Et le produit se positionne à une température $\theta_s$ supérieure à la température d'ébullition de l'eau à la pression totale $p_t$. Or au cours de l'ébullition, on a la pression de vapeur d'eau à la surface du produit $p_s$ qui est égale à la pression totale $p_t$ , d'où :

$$p'_{\theta_s} = \frac{p_t}{a_{w,s}} \qquad (1.4)$$

Ainsi, lorsque l'activité de l'eau à la surface du produit diminue, la pression de vapeur saturante de l'eau pure à la température $\theta_s$ ($P'_{\theta_s}$) augmente. Ce qui entraine une augmentation de la température à la surface du produit jusqu'à une limite qui est celle de la source chaude (**Bimbenet, Duquenoy & Trystram**, 2002).

### I.2.3- SECHAGE PAR MICROONDES

#### I.2.3.1- DEFINITION

Le séchage par microondes appartient au type de séchage par ébullition et obéit à un transfert de chaleur par rayonnement. Ce rayonnement, issu des ondes électromagnétiques, a une fréquence qui se situe entre celle de la lumière infrarouge et celle des ondes de télévision (figure 1.8). Sa longueur d'onde est comprise entre 1 mm et 1 m, et sa fréquence varie de 300 Mhz à 300 Ghz, en utilisant comme énergie primaire, l'électricité (**Rougier**, 2003). Dans le spectre, elles se situent dans les hyperfréquences, entre les ondes radios ($10^8$ Hz) et l'infrarouge ($10^{12}$ Hz).

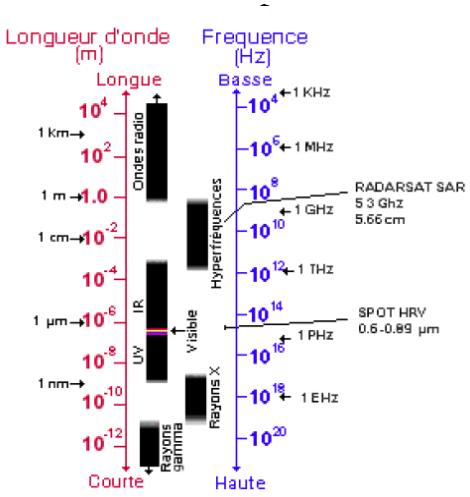



**Figure 1.8-** *Le spectre électromagnétique où se localise les microondes (hyperfréquence)* (**Heistercamp *et al*,** 2002)

### I.2.3.2- MECANISME DE CHAUFFAGE DES MICROONDES

#### I.2.3.2.1- Principe

Le phénomène fondamental responsable du chauffage microondes (appelé aussi chauffage par hystérésis diélectrique) est la dégradation par dissipation d'une partie de l'énergie transportée par l'onde électromagnétique. Un matériau diélectrique est un isolant donc un mauvais conducteur d'électricité. Il s'échauffe du fait de la polarisation et de la rotation de ses dipôles (figure 1.9) puis de leur relaxation lorsqu'ils sont soumis à des champs électriques alternatifs. Le dégagement de chaleur résultant diffère fondamentalement du chauffage par effet Joule qui est provoqué par des frictions internes entre les électrons et les molécules. De plus, contrairement au chauffage classique, il a lieu dans le volume, d'où son appellation de « chauffage volumique ».




**Figure 1.9-** *Mouvement d'un dipôle dans un champ électrique* (**Singh & Heldman,** 2001).

#### I.2.3.2.2- Relaxation diélectrique

La relaxation ou hystérésis diélectrique intervient lorsque le champ électrique responsable de la polarisation du matériau est supprimé brusquement, du fait du déphasage entre la rotation du champ et celui du dipôle. Le matériau a alors besoin d'un certain temps dit temps de relaxation pour retourner à son désordre moléculaire initial. C'est le temps nécessaire pour que la polarisation décroisse à 1/e de sa valeur initiale (**Zagrouba**, 1993).

A basses fréquences, le mouvement imposé aux molécules polarisées est lent, celles-ci se synchronisent sans difficultés sur les oscillations du champ. Mais lorsque les fréquences sont plus élevées, l'inertie des molécules et les forces des liaisons qui s'opposent au mouvement deviennent importantes. La constance diélectrique du matériau ne dépend alors plus de la fréquence, on dit que le matériau se tétanise (**Lecharpentier**, 2000). Entre ces deux zones de fréquence, il existe une plage dite de relaxation ou intervient un déphasage entre le champ et les dipôles. Ce déphasage est appelé angle de polarité noté $\delta$. C'est dans cette bande de fréquence que le matériau récupère de l'énergie du champ électrique et la dissipe en chaleur.

#### I.2.3.3- PARAMETRES INFLUENÇANT LE SECHAGE MICROONDES

### I.2.3.3.1- Propriétés diélectriques des aliments

Dans le traitement microondes, seules les propriétés électriques du matériel à chauffer sont importantes pour la dissipation de l'énergie électrique en chaleur. Le matériau est en effet caractérisé par sa permittivité complexe qui s'exprime dans le cas d'un matériau diélectrique où l'effet joule peut être négligé par l'équation (1.5) :

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \qquad (1.5)$$

Cette permittivité complexe fait intervenir la permittivité relative du matériau appelé aussi *constante diélectrique* $\varepsilon'$ et le *facteur de perte diélectrique* ou *coefficient d'absorption* $\varepsilon''$. La constante diélectrique du matériau $\varepsilon'$, exprime l'habilité du matériel à stocker l'énergie électrique, et le facteur de perte $\varepsilon''$, dénote de la capacité du matériau à dissiper l'énergie électrique en chaleur. Ces propriétés donnent une indication des capacités électriques isolantes du matériel. En fait, les aliments étant des isolants, ils absorbent généralement une grande fraction de l'énergie micro-onde d'où leur chauffage instantané (**Mudgett**, 1986).

On définit par ailleurs la tangente de l'angle de perte ($\tan \delta$) qui fournit une indication sur la profondeur de pénétration du champ électrique dans le matériau Elle est proportionnelle au déphasage entre le champ électromagnétique et les dipôles et définie par la relation :

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \qquad (1.6)$$

Pour un produit donné, le facteur de perte n'est pas une valeur constante. Il dépend, entre autres, de la température et de la teneur en eau du matériau puis de la fréquence de l'onde, comme le présente le tableau en annexe I (qui présente en général les propriétés diélectriques de

quelques fruits et légumes). Par exemple, la constante diélectrique $\varepsilon'$[3] et le facteur de perte $\varepsilon''$[3] de la tomate (cerise) mesurées à 2450 MHz, et 20°C sont respectivement de 71±0,5 et 16,2 ± 0,5 (**De los Reyes *et al.***, 2007)

### I.2.3.3.2- Puissance microondes dissipée

La puissance microondes est en réalité une densité de puissance (ou puissance volumique) dissipée dans le produit. L'énergie microondes en elle-même n'est pas une énergie thermique. La chaleur provient plutôt de la conséquence de l'interaction entre l'énergie des microondes et le matériau. La conversion de l'énergie microondes en chaleur est donné par l'équation suivante (**Copson**, 1975) ; **Decareau & Peterson**, 1986).

$$P_D = 2\pi . f . \varepsilon_0 . \varepsilon'' E^2 \qquad (1.7)$$

Avec

$P_D$ : densité de puissance dissipée (W/m$^3$) ;
$f$ : fréquence du champ électritique (Hz) ;
$\varepsilon_0$ : permittivité du vide (8,85.10$^{-12}$ F/m),
$\varepsilon''$ : facteur de pertes du matériau
$E$ : champ électrique dans le matériau[4] (V/m)

Le facteur de perte diélectrique $\varepsilon''$ définie dans l'équation (1.6), introduit dans l'équation (1.7) devient alors :

$$P_D = 2\pi . \varepsilon_0 f . \varepsilon' . \tan\delta . E^2 \qquad (1.8)$$

Ou encore :

$$P_D = 55{,}63 \cdot 10^{-12} f . \varepsilon'' . E^2 \quad (\mathrm{W/m^3}) \qquad (1.9)$$

Cette dernière formule montre que la puissance microondes dissipée dépend essentiellement du facteur de perte $\varepsilon''$ puisque f et E sont en général constants pour un équipement microondes donné. Toutefois, ceci n'est vrai que lorsque l'énergie apportée par les microondes est

[3] Il est à noter que $\varepsilon'$ et $\varepsilon''$ n'ont pas d'unité car sont relatifs à la permittivité ou constante diélectrique du vide $\varepsilon_0$. Ainsi, où $\varepsilon$ représente la permittivité ou constante diélectrique absolue du matériau et s'exprime en (F.m$^{-1}$) et

[4] Le champ électrique dans le matériau n'est pas toujours égal au champ appliqué, il dépend de la forme et de l'orientation du matériel par rapport au champ appliqué

excédentaire au regard de ce qui est nécessaire au chauffage du produit à une température donnée.

En effet, lorsqu'un produit de faible masse $m$ est exposé à un champ microondes de puissance incidente élevée $P_i$ (constante durant le traitement), une partie de $P_i$ est absorbée ($P_{ab}$) tandis que l'autre partie de $P_i$ est réfléchie ($P_r$).On dit que la puissance absorbée est limitante et que les microondes distribuent plus d'énergie que le produit n'en est capable d'absorber. $P_{ab}$ dépend donc des propriétés diélectriques du produit.

Cependant, lorsque la masse $m$ est suffisante, $P_{ab}$ devient égale à $P_i$ (qui est alors limitante); le produit serait alors capable d'absorber une puissance supérieure à celle que fournissent les microondes. Toute l'énergie fournie par les microondes est alors absorbée par le produit selon la relation :

$$P_{ab}.t = mC_p(\theta - \theta_0) \qquad (1.10)$$

Avec

$m$ : masse de produit exposé

$C_p$ : chaleur spécifique du produit (kJ.kg$^{-1}$.°C$^{-1}$)

$\theta_0$ : température initiale du produit (°C)

$\theta$ : température du produit au temps t. (°C)

D'où :

$$\theta = \left(\frac{P_i}{mC_p}\right).t + \theta_0 \qquad (1.11)$$

La vitesse de chauffage devient alors :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{P_i}{mC_p} \qquad (1.12)$$

Dans cette relation, les propriétés diélectriques du matériau n'interviennent absolument plus. Ainsi, lorsque la puissance incidente est complètement absorbée par le produit, seule intervient la chaleur spécifique du produit (**Hanna Hakim**, 2008).

### I.2.3.3.3- Profondeur de pénétration des microondes

L'absorption progressive de la puissance est caractérisée par la profondeur de pénétration ($d_p$). Elle est définie comme la profondeur dans le matériau pour laquelle le transfert de l'onde a été réduit de 37% (figure 1.10) par rapport à la puissance entrante (**Buffler**, 1993). Autrement dit, 63% de la puissance transférée est dissipée dans la couche surfacique d'épaisseur $d_p$ définie par:

$$d_p = \frac{c_0}{2\pi . f \sqrt{2\varepsilon' \left(\sqrt{1+(\varepsilon''/\varepsilon')}-1\right)}} \qquad (1.13)$$

Avec

$d_p$ : profondeur de pénétration par rapport à la surface (m)

$c_0$ : vitesse de propagation de l'onde dans le vide ($c_0 = 3.10^8$ m.s $^{-1}$)

$\varepsilon'$ : constante diélectrique du matériau

$\varepsilon''$: facteur de perte diélectrique

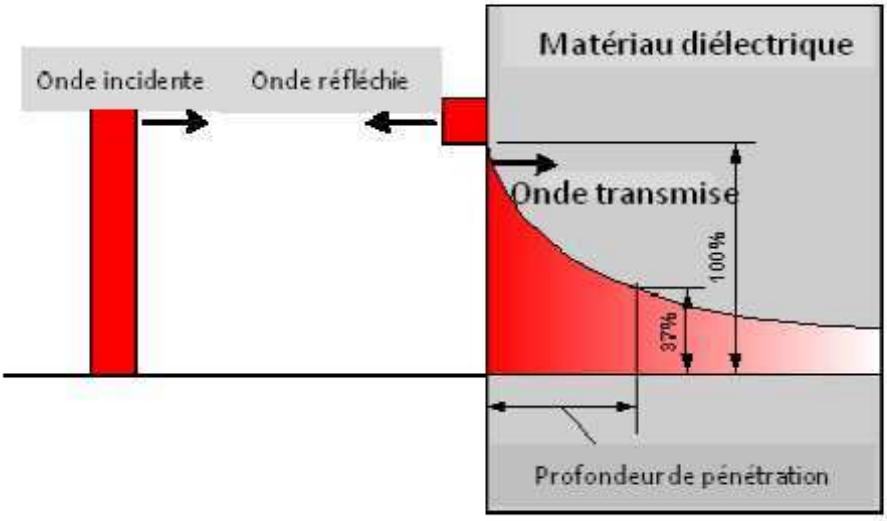



**Figure 1.10-** *Transit de puissance lorsqu'une onde électromagnétique atteint un matériau diélectrique possédant un important facteur de perte* (**Callebaut,** 2007).

La profondeur de pénétration est inversement proportionnelle à la fréquence. De ce fait, pour un chauffage par radiofréquences, où les bandes de fréquence sont faibles (13,56 MHz et 27,12 MHz), la profondeur de pénétration est grande (souvent de plus d'un mètre, allant jusqu'a une dizaine de mètres). D'où la qualification du chauffage par radiofréquences d'uniforme, avec une idée de profondeur de pénétration peu utile. Par contre pour un chauffage par microondes, où les fréquences sont approximativement 100 fois plus élevées, la profondeur de pénétration est plus faible (de l'ordre du centimètre). Dans ce cas, le chauffage par microondes n'est pas considéré comme uniforme et le paramètre de profondeur de pénétration est plus important (**Callebaut**, 2007).

### I.2.3.3.4- Effet du facteur de perte

Le facteur de perte $\varepsilon''$ d'un matériau varie avec sa température, sa teneur en eau et la fréquence du champ électrique qui lui est soumis (figure 1.11) (**Sosa-Morales *et al.,*** 2010). Leurs variations modifiant le facteur de perte va affecter le processus de chauffage microondes de façon

significative. L'augmentation soudaine de la température du produit, connue sous le nom d'emballement thermique, se produit souvent consécutivement à un changement brusque du facteur de perte au niveau des parties les plus chaudes du produit.

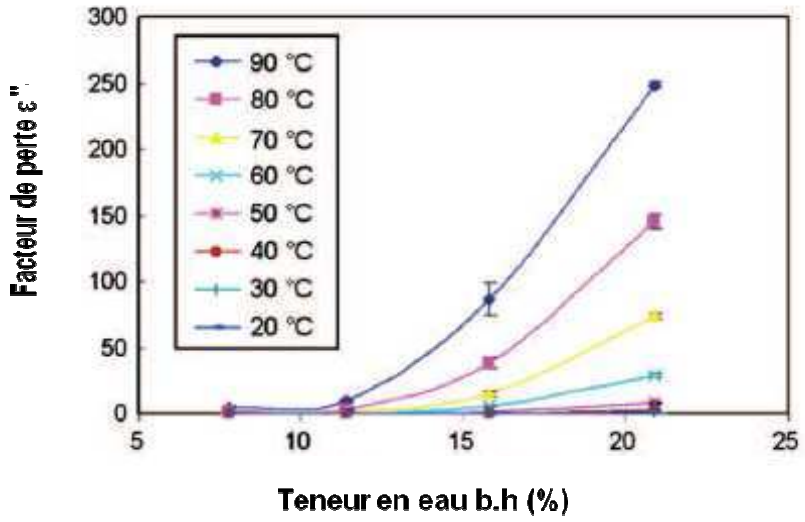



**Figure 1.11**- *Dépendance de la température et de la teneur en eau (base humide) sur le facteur de perte à 27 MHz*. (**Guo *et al.,*** 2008).

L'eau joue un rôle important en séchage microonde, avec son asymétrie prononcée (figure 1.12) et son moment dipolaire parmi les plus élevés, lui conférant un facteur de perte très important pour le chauffage.

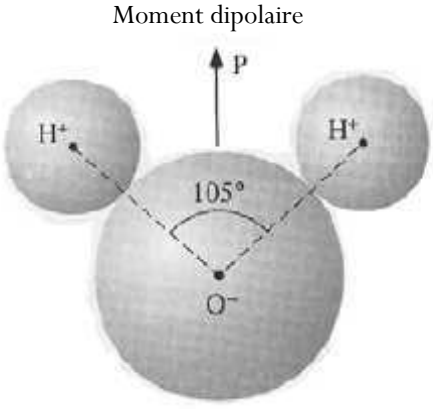



**Figure 1.12-** *Schéma d'une molécule d'eau* (**Heistercamp *et al.*,** 2002)

C'est une molécule simple qui présente plusieurs domaines d'absorption qui dépendent de la fréquence et des différents états de l'eau (liée, libre…), en plus de la possibilité d'une dissipation accrue si l'eau contient des sels dissous. La figure 1.13 présente les valeurs des facteurs de pertes pour différents états de l'eau.

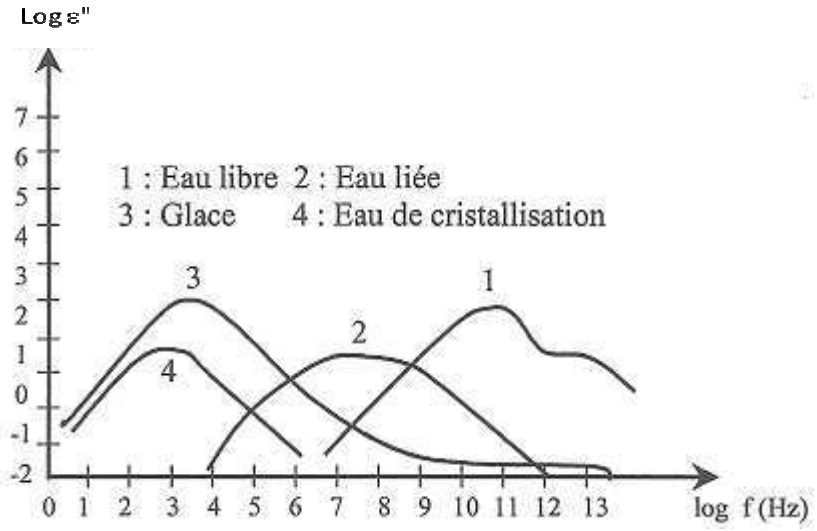



**Figure 1.13-** *Pertes diélectriques associées aux différentes formes d'eau* (**Thuéry,** 1989)

On note ainsi que le point d'intersection eau libre- eau liée se trouve dans la zone de fréquence des microondes. Le maximum se déplace vers les fréquences les plus élevées, lorsque la température augmente, ce qui correspond à une plus grande mobilité des molécules d'eau. Ainsi les matériaux humides contenant une quantité plus ou moins grande d'eau sont susceptibles d'être réceptifs au rayonnement microondes, même si une fois secs ils l'absorbent moins. Toutefois l'eau liquide constitue avant tout un puissant réflecteur d'onde. On peut en effet remarquer que sa permittivité reste voisine de 60 à 80 suivant la température (tableau 1.4). Pour une valeur ε' de 80, cela signifie que 65% de la puissance incidente est réfléchie et seulement 35% y sont absorbé. Pour pallier ce problème, il est nécessaire de disposer d'un applicateur qui permet des réflexions successives entre une paroi métallique et une lame d'eau. Le cas est différent si l'eau est dispersée dans un milieu poreux. La permittivité apparente est alors beaucoup plus faible et la pénétration de l'onde nettement plus importante (**Zagrouba**, 1993).

**Tableau 1.4-** *Caractéristiques diélectriques de l'eau pour une fréquence de 2,450 GHz* (**Zagrouba,** 1993)

| **T(°C)** | 0 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **ε'** | 87 | 80 | 72 | 65 | 58 | 50 |
| **ε"** | 20 | 12 | 7 | 4,5 | 2,7 | 2 |

#### I.2.3.4- EVOLUTION DE LA TEMPERATURE AU COURS DU SECHAGE MICROONDES

Au cours du séchage microondes, le mécanisme de chauffage expliqué plus haut permet à l'eau de s'échauffer au cœur du matériau et en vaporise une faible partie à l'intérieur. Ceci permet d'effectuer le séchage à une température d'environ 100 °C ; c'est le séchage par ébullition qui a lieu en début de séchage microondes. Le traitement est plus rapide et plus homogène si les parties déjà sèches n'absorbent plus les microondes et ne s'échauffe presque pas (**ADEME**, 1998). Dans ce cas, la température du matériau diminue progressivement avec la concentration d'eau et le séchage se termine rapidement. C'est alors le séchage par entraînement qui se produit. Par contre, si le matériau a des propriétés absorbantes (ce qui est le cas pour la majorité des produits alimentaires), la température ne cesse d'augmenter et il peut se produire un emballement thermique dont le résultat est la destruction du produit (**ADEME**, 1998). On peut donc dire qu'au cours du séchage microondes la température évolue selon les modes de séchage par ébullition et par entraînement.

### I.2.4- TECHNOLOGIES DE SECHAGE COMBINEES AUX MICROONDES

Pour comparer différentes techniques de déshydratation, trois aspects principaux du processus peuvent être utilisés. Il s'agit de la vitesse de déshydratation, de la qualité et des caractéristiques du produit final, et des coûts énergétiques et économiques du processus (**Scaman & Durance**, 2005).

L'objectif de ce chapitre est de montrer l'utilité de la combinaison des microondes avec d'autres types de séchage pour améliorer la qualité des produits séchés en général et des fruits et légumes en particulier. Il traitera entre autres :

- du séchage microondes sous-vide ;
- du séchage microondes combinés à la lyophilisation ;
- du séchage en lit fluidisé combiné aux microondes
- et du séchage microondes combinés à l'air chaud,

#### I.2.4.1- SECHAGE PAR MICROONDES SOUS VIDE

Le séchage microondes sous vide est un procédé de déshydratation qui utilise le rayonnement microondes (à une fréquence de 2450 MHz en général) pour la production de chaleur au cœur du produit, associé à un vide poussé situé au dessus du point triple de l'eau et en dessous de la pression atmosphérique (0,61-101,33 kPa) (**Scaman & Durance**, 2005).
L'énergie électromagnétique des microondes pénètre dans le produit, où elle est convertie en énergie thermique, qui conduit à un chauffage rapide. Le vide utilisé permet de réduire le point

d'ébullition de l'eau du produit, permettant ainsi un séchage à basse température. Ce vide permet également d'accentuer la différence de pression de vapeur d'eau entre la surface du produit et l'air de séchage qui induit l'augmentation de la vitesse de séchage.
Les limites des technologies conventionnelles de séchage, telles que l'air ou la lyophilisation, dans certains domaines, peuvent être traitées par séchage microondes sous vide.

#### I.2.4.2- SECHAGE PAR MICROONDES COMBINE A LA LYOPHILISATION

La lyophilisation, appelée autrefois cryodessiccation, est un procédé basé sur deux opérations unitaires chronologiques que sont la congélation et la déshydratation. La congélation est la première opération réalisée pour la transformation de l'eau liquide du produit en glace, suivie de la déshydratation qui est réalisée en deux étapes. D'abord une sublimation (dite déshydratation primaire) réalisée à basse pression, permet d'éliminer la majeure partie de l'eau (solide) grâce à un apport de chaleur au produit, par conduction (en général) ou par rayonnement, suivi d'une désorption (dite déshydratation secondaire) qui permet l'élimination de la fraction d'eau résiduelle non cristallisée du produit (**René & Marin**, 2000). La lyophilisation permet une conservation à long terme grâce à l'abaissement de l'activité de l'eau du produit de l'ordre de 0,2 (**René & Marin**, 2000). Elle est employée en tant que méthode douce de déshydratation pour les matériaux sensibles à la chaleur et est limitée aux produits à haute valeur ajoutée, de l'industrie alimentaire et pharmaceutiques (**Dumais**, 1999). La lyophilisation permet donc d'obtenir des produits finaux de haute qualité ; toutefois, elle est très énergétivore (consommation énergétique de 1 500 à 2 500 kWh par tonne d'eau à éliminer). La faible productivité en lyophilisation est due au mode de fonctionnement sous vide, le plus souvent discontinu, et au chauffage par conduction, qui se traduit par des durées de traitement importantes (d'une dizaine d'heures à plusieurs jours) (**René & Marin**, 2000). Cependant, la lyophilisation combinée aux microondes (pour le chauffage) conduit à un système qui permet de remédier à ces inconvénients, car les microondes ont pour caractéristique le chauffage volumique et rapide des matériaux. Selon les expériences et les simulations numériques de **(Tao *et al.,*** 2005) la lyophilisation par microondes semble être l'une des techniques les plus prometteuses pour accélérer la vitesse de déshydratation et augmenter la qualité globale du produit. En effet des études ont montré que pour augmenter la vitesse de lyophilisation, l'utilisation du chauffage par microondes en lieu et place du chauffage traditionnel par conduction, améliore le transfert de chaleur et de masse (**Duan, Zhang, & Mujumdar**, 2007 ; **Duan *et al.,*** 2008a, 2008b). Toutefois, cette technique, appelée séchage par lyophilisation microondes, est confrontée au problème du chauffage excessif des aliments soumis aux microondes.

### I.2.4.3- SECHAGE EN LIT FLUIDISE COMBINE AUX MICROONDES

Durant le processus de séchage microondes (MO), le chauffage non uniforme peut engendrer des brûlures partielles dans les produits à forte teneur en sucre (**Zhang** et al., 2006). Pour cela diverses méthodes de séchage microondes ont été développées pour obtenir un chauffage uniforme. Entre autre le séchage en lit fluidisé combiné aux microondes qui est un procédé hybride de séchage permettant l'amélioration de la qualité du produit séché. Avec cette méthode, le produit est constamment en mouvement dans la cavité MO afin que ses différentes parties reçoivent un rayonnement MO proche de la moyenne de l'intensité du champ électrique spatial. L'application d'une énergie MO moyenne peut être réalisée soit par des moyens chimiques (**Torringa *et al.,*** 2001) ou par l'agitation pneumatique (**Feng & Tang,** 1998). La fluidisation assure une agitation pneumatique aux particules dans le lit de séchage. Il facilite également les transferts de chaleur et de masse due à une plus grande surface d'échange et à une couche limite sans cesse renouvelée à la surface des particules. Par conséquent, la combinaison du lit fluidisé au séchage MO est considéré comme un moyen efficace pour résoudre le problème de l'unique et inégale répartition des microondes sur le matériau au cours d'un séchage MO (**Zhang *et al.,*** 2006), conduisant à un chauffage hétérogène localisé responsable de l'emballement thermique. La combinaison du séchage en lit fluidisé aux microondes permet donc d'avoir des produits de bonne qualité physique exempte de points noirs.

### I.2.4.4- SECHAGE PAR MICROONDES COMBINE A L'AIR CHAUD

En séchage à air chaud (ou classique), la vitesse de séchage est plus élevée au démarrage et baisse progressivement lorsque le front d'évaporation de l'eau disparait rendant ainsi la fin du séchage plus long. La température est alors plus élevée en surface et moins élevée à l'intérieur du produit. Dans ce cas, le processus de séchage se fonde uniquement sur la conduction de la chaleur de la surface à l'intérieur conduisant à un durcissement du produit (**Sanga, Mujumdar, & Raghavan**, 2002). Hors mis la baisse de la qualité du produit final, le séchage à air chaud souffre d'une forte consommation d'énergie.

En séchage microondes et haute fréquence, la génération de chaleur volumique dans l'échantillon humide, due a une absorption de l'énergie MO par les molécules d'eau, entraine une élévation de la température interne qui conduit à une rapide élimination de l'eau du produit, comparé au séchage classique (**Mujumdar**, 1995). Ainsi, l'utilisation des séchoirs microondes offrent une économie significative d'énergie et de temps comparée aux séchoirs classiques. Le temps est encore plus réduit, lorsqu'on combine les microondes avec l'air chaud (séchage classique) (**McLoughlin, McMinn, & Magee**, 2005).

L'application de l'énergie microondes associée à l'air chaud pour le séchage des produits agricoles, est une bonne méthode d'approche à la résolution de certains problèmes liés à l'utilisation des microondes seuls. En effet le séchage microondes provoque de nombreux dégâts physiques tels que l'apparition de points chauds et de carbonisation du produit. Ces dégâts physiques sont le résultat de températures locales qui ne cessent d'augmenter, bien que le facteur de perte du produit diminue avec la réduction de la teneur en eau (**Lu, Tang, & Liang**, 1998).

Un des inconvénients est la non-uniformité inhérente au champ électrique dans une cavité microondes. Or le succès du chauffage microondes des fruits et légumes avec une teneur eau initiale élevée dépend souvent de l'uniformité du chauffage. Bien que ce problème puisse être partiellement compensé en utilisant des guides d'ondes et un plateau tournant (**Cohen & Yang**, 1995), il existe des limites sur la densité d'énergie qui peut être appliquée.

En fin de séchage, puisque seulement une quantité limitée d'eau est disponible, la température du produit peut facilement augmenter à un niveau qui peut entraîner un emballement thermique. Il est donc difficile de maîtriser la température finale du produit dans le séchage microondes, comparativement au séchage à air chaud où la température du produit ne dépasse jamais celle de l'air de séchage.

Un autre des inconvénients est qu'un transfert de matière trop rapide sous l'effet de la puissance microondes, peut causer des dommages à la qualité ou des changements indésirables de la texture du produit (**Nijhuis *et al.,*** 1998)**.** Cependant, que cela soit ou ne soit pas une limite, dépend des attributs désirés de la qualité des produits finaux.

## I.3- PILOTAGE ET MODELISATION DU SECHAGE MICROONDES

### I.3.1- INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous aborderons d'abord les différentes stratégies de pilotage du séchage microondes de la littérature qui permettent l'amélioration la qualité du produit. Ensuite nous présenterons les différents types de modèles utilisés pour prédire l'évolution de l'humidité des produits agricoles en général et des fruits et légumes en particuliers.

### I.3.2- PILOTAGE DU SECHAGE MICROONDES

#### I.3.2.1- DEFINITION DU PILOTAGE OU CONTROLE COMMANDE

Le rôle du contrôle commande des procédés est d'assurer la surveillance et la maîtrise d'un procédé en industrie. C'est une véritable interface homme-machine qui nécessite une réaction rapide, de qualité et fiable dont l'objectif est de tout commander et réguler à distance, y compris en prévoyant des opérations de maintenance.

Le contrôle-commande peut être définie comme un système informatique réalisant l'acquisition de données par l'intermédiaire de capteurs-transmetteurs et élabore des commandes envoyées au procédé physique grâce à des actionneurs (**Pinard**, 2009). La programmation des systèmes informatiques destinés au pilotage de procédés physiques connait aujourd'hui un progrès avec les langages graphiques (exemple logiciel LabView) plus simples, plus intuitifs et plus puissants du fait des bibliothèques disponibles.

#### I.3.2.2- ADAPTATION DE LA PUISSANCE MICROONDES LORS DU SECHAGE

### I.3.2.2.1- Action en tout ou rien sur la puissance microondes suivant un schéma prédéfini (fonctionnement par intermittence)

Les avantages du séchage intermittent - séchage avec des périodes de repos - ont été bien établis pour une variété de produits avec ou sans microondes (**Farkas & Rendik**, 1997; **Harnoy & Radjewski**, 1982 ; **Shivhare, Raghavan, & Bosisio**, 1992).

Face au phénomène d'emballement thermique qui peut se produire lors d'un séchage microondes/air chaud (MOAC) à puissance constante (i.e. une puissance spécifique croissante au cours du séchage), et à la dégradation consécutive de la qualité du produit, certains auteurs, dont **Soysal *et al*** (2009), proposent de travailler par intermittence. Selon **Gunasekaran**, (1999), l'application de l'énergie microondes par intermittence permet aussi d'améliorer l'efficacité des procédés. **Shivhare *et al.*,** (1992) ont étudié les caractéristiques des effets du séchage MOAC par intermittence sur le maïs. Ils ont rapporté que l'utilisation des MOAC par intermittence pour le séchage du maïs entraînait la réduction du temps de séchage par rapport au séchage MOAC en continu. Ils indiquent que le niveau de puissance microondes et la période d'intermittence ont un effet sur la vitesse de séchage et la qualité des produits.

**Carroll & Churchill** (1986) ont indiqué que le chauffage par intermittence (marche-arrêt) avec une densité de flux thermique fixe est particulièrement avantageux car il permet de limiter la température maximale à la surface du produit.

La technique généralement utilisée est la régulation " tout ou rien" avec une période de mise en marche et une période d'arrêt (ON/OFF) des microondes. **Gunasekaran** (1999) et **Soysal**, ***et al.,*** (2009) ont utilisé cette régulation par intermittence au cours de leurs travaux de séchage microondes et défini un rapport d'impulsion (ou "pulse ratio " (PR)) des microondes servant de consigne pour la régulation selon l'équation (1.14).

$$PR = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{on}} \qquad (1.14)$$

où $t_{on}$ est le temps de mise en marche des microondes et $t_{off}$ est le temps d'arrêt des microondes.

Par exemple, pour des PR de 2,0-2,5-3,0 et 4,0 - les timings marche-arrêt (on/off) respectifs à utiliser lors du séchage MO intermittent sont 30 s de marche -30 s d'arrêt, 30 s de marche -45 s d'arrêt , 30 s de marche -60 s d'arrêt, 30 s de marche -90 s d'arrêt.

### I.3.2.2.2- Adaptation de la puissance microondes par étapes et en fonction de la teneur eau

La teneur en eau du produit est un paramètre très influent dans le séchage microondes. En effet l'absorption des ondes électromagnétiques est fonction de l'humidité du produit qui varie au cours du procédé de séchage. C'est ce qui a conduit certains chercheurs à étudier une technique de régulation basée sur la diminution de puissance microondes à appliquer, au cours des différentes phases du séchage en fonction de la teneur en eau du produit. **Pereira, Marsaioli, & Ahrné** (2007) au cours du séchage MOAC de la banane ont appliqué cette technique comme le montre la figure 1.14. Elle a consisté à réduire la puissance microondes appliquée à chaque phase du processus de séchage. A la première phase du séchage (qui concerne en général la période de mise en température), les 100% de la puissance microondes initiale et la valeur maximale de la température de l'air de séchage de l'étude ont été appliquées. Pour la seconde phase du séchage, cette puissance a été réduite de moitié avec une légère diminution de la température de l'air. Dans la dernière phase on ne réduit que la puissance appliquée par rapport à celle de la seconde phase en testant des puissances variant de 0 à 3/5 de puissance de celle de la phase II.

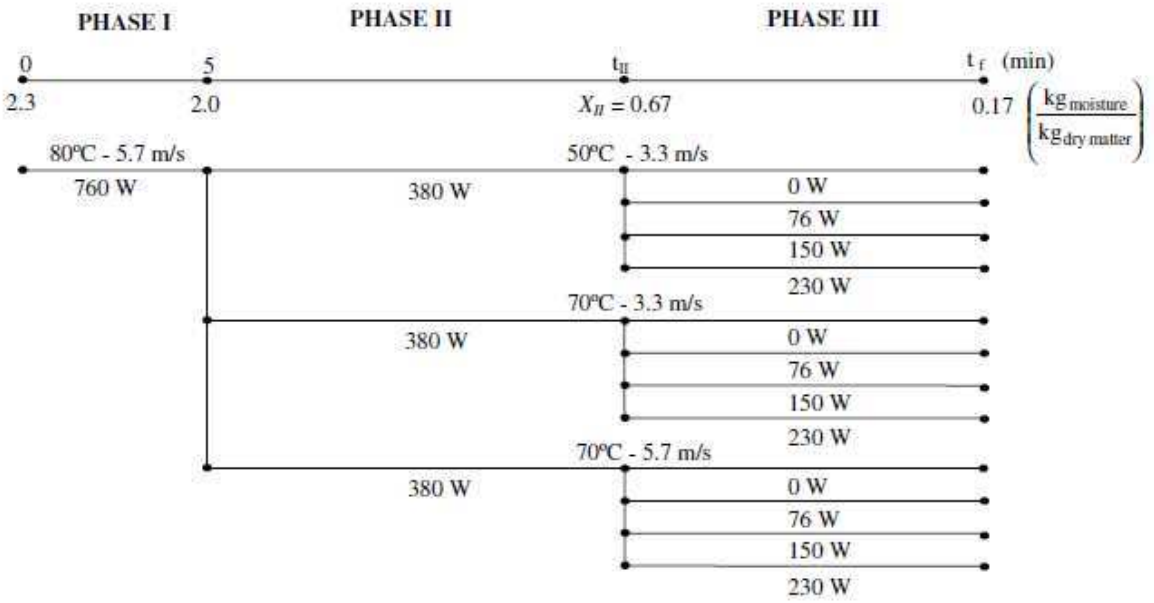



**Figure 1.14-** *Illustration schématique d'un type de régulation de la puissance appliquée au cours du séchage MOAC de la banane* (**Pereira, Marsaioli, & Ahrné**, **2007**).

Les résultats de cette étude indiquent que, l'augmentation de la puissance MO en fin de séchage entraine une montée rapide de la température du produit (emballement thermique) et par conséquent une carbonisation du produit séché. D'après ces résultats nous voyons qu'une maitrise de la qualité du produit séché passe par une utilisation de MO à faible puissance ou par la maitrise de cette puissance (diminution) en fin de séchage.

#### I.3.2.3- REGULATION DE LA TEMPERATURE DU PRODUIT LORS DU SECHAGE MICROONDES

Au cours d'un processus de séchage microondes, le volume du produit, sa masse et son humidité sont en constante évolution. Le volume du produit est en baisse, la masse est réduite, et la teneur en eau décroit. En outre, les vitesses de ces changements diffèrent d'une étape à l'autre du séchage. Ces différences et les changements nécessitent une variation de la puissance microondes au cours du processus de séchage pour une meilleure efficacité du séchage en général (**Li, Raghavan, & Orsat**, 2010b). C'est dans ce cadre que des recherches très récentes ont été menées en appliquant différentes stratégies de séchage afin de réduire la dégradation du produit et la consommation énergétique (**Li, Raghavan, & Orsat**, 2010b). Cela a nécessité un ajustement de la puissance microondes au cours du temps à l'aide de pilotes de laboratoire biens instrumentés qui permettent une commande automatique (par exemple, à l'aide du logiciel LabView de National Instrument Inc.) de la puissance microondes requise.
Différentes stratégies de régulation de la puissance de façon automatique, basées sur des programmes conçus dans LabView, ont vu le jour (**Li, Raghavan, & Orsat**, 2010a). Il s'agit de:

- la régulation de la température du produit à l'aide d'une boucle de rétroaction sur la puissance microondes. Dans cette stratégie, l'opération sous tension / hors tension (ON/OFF) a été contrôlée avec un programme développé sous LabView: lorsque la température réelle est inférieure à celle de la consigne, le générateur microondes est mis en position ON et dans le cas contraire en position OFF,
- la régulation de la puissance à partir non seulement de la température mesurée mais aussi de relations, établies au cours de la première stratégie, entre la puissance et le temps ou entre la puissance et la teneur en eau. Les teneurs en eau étant obtenues à partir de la mesure de la masse en continu, le but étant de maintenir une température constante sans contrôle de cette dernière et sans mesure de la masse afin de limiter l'instrumentation nécessaire.

### I.3.3- MODELISATION DU SECHAGE MICROONDES COMBINE A L'AIR CHAUD

La modélisation en génie des procédés agroalimentaire peut être définie comme un moyen d'abstraire un système afin d'en prédire certains des comportements ou paramètres

(**Mujumdar**, 1995 ; **Strumillo** 1986). Plusieurs approches et outils de modélisation ont été utilisés pour la construction et l'exploitation des modèles dans le cadre de l'analyse par simulation des procédés de séchage par microondes. Les modèles de procédés en génie alimentaire visent à améliorer la conception des opérations unitaires en optimisant des résultats physiques ou chimiques, tels que la maximisation du rendement de transformation et de rétention des éléments nutritifs et la minimisation de la consommation d'énergie.

Dans la littérature la modélisation du séchage microondes combiné à l'air chaud (MOAC) a été abordée de plusieurs manières. Certains mettent l'accent sur le fonctionnement interne du système (c'est-à-dire la connaissance des phénomènes physiques, chimiques et biologiques) constitué par le dispositif expérimental; d'autres s'occupent de modéliser les sorties en fonction des entrées sans s'occuper de la composition interne du système. Et entre les deux il existe ceux qui partent des modèles théoriques pour aboutir à des modèles non théoriques basés sur des hypothèses de négligence de tel où tel phénomène. Ainsi nous avons distingué trois types de modèles prédictifs que sont les modèles théoriques, empiriques et semi-empiriques (figure 1.15).

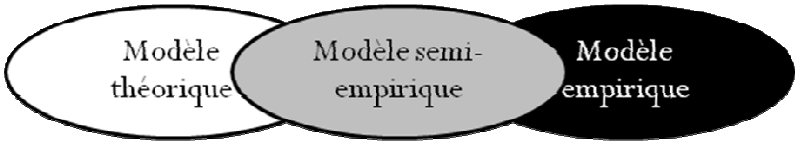



**Figure 1.15-** *Typologie des modèles de séchage microondes dans la littérature*

### I.3.3.1- MODELES THEORIQUES

Appelés aussi modèles de "connaissances", les modèles théoriques en séchage MOAC sont basés sur la modélisation des transferts simultanés de chaleur et de matière (**Sanga, Mujumdar, & Raghavan**, 2002). Si plusieurs études ont été menées sur la modélisation théorique du séchage en lit fluidisé combiné aux microondes (**Abbasi & Mowla**, 2008), peu d'études sont disponibles dans la littérature sur la modélisation théorique du transfert simultané de chaleur et de masse dans les systèmes de séchage combiné microondes air chaud (MOAC) (**Sanga, Mujumdar, & Raghavan**, 2002). La démarche de modélisation consiste à :

- formuler les équations qui gouvernent le transfert de masse et de chaleur. En général l'équation de conservation de masse donne la seconde loi de diffusion de Fick :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ap}\nabla^2(X) \qquad (1.15)$$

et pour le bilan de chaleur donne la seconde loi de Fourier :

$$\rho Cp\frac{\partial T}{\partial t} = k\nabla^2(T) + Q \qquad (1.16)$$

Avec :

$X$ : teneur en eau (kg eau/kg de matière sèche (MS)) ;

$D_{ap}$ : diffusivité apparente de l'eau ($m^2/s$) ;

$k$ : conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$) ;

$\rho$ : masse volumique du produit ($kg/m^3$) ;

$C_p$ : chaleur spécifique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$) ;

Q :terme source, effet des microondes et/ou de l'évaporation de l'eau par exemple ($W/m^3$).

$D_{ap}$ est en général déterminée par une équation empirique ;

- formuler les conditions initiales et aux limites. En supposant que l'échantillon est uniforme en teneur en eau et température initiales, on aura :

Pour la teneur en eau

$$\begin{cases} t = 0,\ 0 \le x \ge L,\ X = X_0 \\ t \ge 0,\quad x = 0,\ \dfrac{\partial X}{\partial x} = 0 \\ t \ge 0,\quad r = L,\ X = X_e \end{cases} \qquad (1.17)$$

Pour la température

$$\begin{cases} t = 0,\ 0 \le x \ge L,\ T = T_0 \\ t \ge 0,\quad x = 0,\ \dfrac{\partial T}{\partial x} = 0 \\ t \ge 0,\quad x = L,\ T = T_0 - T_a \end{cases} \qquad (1.18)$$

Avec :

$T_a$ : température de l'air (°C),

$T_0$ : température initiale (°C),

$L$ : épaisseur du produit (m)

$X_e$ : teneur en eau d'équilibre (kg eau/kg de MS)

- résoudre les équations couplées de transfert de masse et de chaleur par une méthode numérique,
- et enfin comparer les données prédites et expérimentales de la teneur en eau et de la température.

### I.3.3.2- MODELES SEMI-THEORIQUES

Les modèles semi-théoriques ou semi-empiriques sont les plus utilisés pour la modélisation des processus de séchage microondes/ air chaud (**Wang *et al.*,** 2007 ; **Sharma & Prasad**, 2004) ; **Alibas**, 2007). Ce type de modèle part en général d'un modèle de connaissance pour aboutir à

la fin à un modèle empirique basé sur la détermination de paramètres par ajustement. Dans la littérature les modèles semi-empiriques visent en général, uniquement la description de l'évolution de la teneur en eau au cours du séchage MOAC.

Il est admis moyennant certaines hypothèses (diffusion de l'eau à l'état liquide dans le produit, coefficient de diffusion constant,..) que les caractéristiques du séchage des produits biologiques dans la phase de ralentissement de la vitesse peuvent être décrites par la seconde loi de diffusion de Fick (qui est un modèle théorique) (Eq 1.15) (**Wang *et al.*,** 2007). La solution de cette équation développée par (**Crank**, 1975) peut être utilisée pour divers produits de forme régulière, comme les produits rectangulaire (assimilé à une plaque infinie), cylindrique (assimilé à un cylindre infini) et sphérique. Ainsi la solution proposée supposant une distribution uniforme de l'humidité initiale et sa valeur à l'équilibre $X_e$ constante, tendant vers zéro en fin de séchage (sont les conditions initiales et à l'équilibre) :

- pour les produits de forme rectangulaire :

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left( - \frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{ap} t}{4L^2} \right) \qquad (1.19)$$

- pour les produits de forme cylindrique :

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left( - \frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{ap} t}{r^2} \right) \qquad (1.20)$$

- pour les produits de forme sphérique :

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left( - \frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{ap} t}{R^2} \right) \qquad (1.21)$$

Avec :

$L$ : demi-épaisseur de la plaque (m)

$r$ : rayon du cylindre (m)

$R$ : rayon de la sphère (m)

$n$ : indice du terme de la série

Ces modèles sont généralement utilisés pour la détermination de la diffusivité apparente de l'eau $D_{ap}$ (supposée constante) dans le produit au cours du séchage MOAC. Les valeurs des diffusivités obtenues à différentes conditions de séchage MOAC permettent d'expliquer les différentes vitesses de séchage et donc le comportement du produit au cours du séchage.

### I.3.3.3- MODELES EMPIRIQUES

Les modèles mathématiques empiriques sont les modèles dits "boites noires", où des paramètres sont ajustés pour simuler des variables de sortie à partir des variables d'entrée sans se soucier du fonctionnement interne du système. La démarche méthodologique consiste à réaliser un ajustement sur des données expérimentales à partir d'une méthode de régression linéaire simple ou multiple. (**Shivhare, Raghavan, & Bosisio**, 1992 ; **Tulasidas, Raghavan, & Mujumdar**, 1995).

Comme modèles empiriques, utilisés pour les procédés de séchage microondes/air chaud, nous avons, entre autres, les modèles quadratiques d'ordre deux issus des plans d'expériences pour surfaces réponses, les modèles de réseaux de neuronaux artificiels (RNA), les algorithmes génétiques etc…Cependant, les plus utilisés dans la littérature sont les modèles issus des plans d'expériences.

- **Les modèles issus des plans expériences**

Ce sont des modèles empiriques qui permettent de modéliser les variations d'une réponse (variable à expliquer) en fonction des facteurs (variables explicatives indépendantes), après avoir identifié les facteurs les plus influents sur la réponse, par une étape préliminaire de criblage ou par les connaissances à priori que l'on a du phénomène. Lorsque les facteurs sont quantitatifs, cette étape se nomme la modélisation des surfaces de réponses (MSR) qui est un préliminaire indispensable à la prédiction et à l'optimisation du procédé (**Govarerts. & Leboulengé**, 2000). Ce sont des modèles d'ordre 2 pour k facteurs quantitatifs qui prennent la forme générale suivante:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i X_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=i+1}^{k} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \qquad (1.22)$$

$Y$ est la réponse, $X_i$ le ième facteur, $\beta_0$ le coefficient constant, $\beta_i$ le coefficient linéaire du facteur $Xi$ , $\beta_{ii}$ le coefficient quadratique $X_i$ et $\beta_{ij}$ le coefficient d'interaction des facteurs $X_i$ et $X_j$.

Le modèle d'ordre deux permet d'analyser la direction, l'amplitude et la forme (ou courbure) de l'effet de chaque facteur sur la réponse ainsi que les effets d'interaction. Il peut également être utilisé pour prédire la réponse pour les conditions expérimentales non étudiées par le plan expérimental. Ces prédictions sont souvent représentées sous forme de surfaces de réponses ou courbes de niveau. Ce type de représentations permet à l'expérimentateur de trouver les conditions expérimentales qui optimisent (maximisent ou minimisent) sa réponse **(Govarerts & Leboulengé**, 2000).

(**Sharma & Prasad**, 2006a) ont généré des modèles empiriques, en utilisant la méthode des surfaces de réponses, qui à partir des variables d'entrée du procédé (puissance microondes P et température de l'air $T_a$) vont simuler des variables réponses à savoir le rapport de couleur (a / b), l'intensité de la saveur, la teneur en vitamine C, le rapport de réhydratation, le temps et la vitesse de séchage. A partir du modèle, ils déterminent comment les paramètres de qualité et de temps de séchage par microondes des gousses d'ail sont liés aux paramètres d'entrée. Les termes des variables d'entrée du modèle sont d'ordre linéaire, quadratique et d'interaction.

(**Botha, Oliveira, & Ahrné**, 2011) ont conçu un modèle empirique à partir d'un plan d'expériences composite centré $2^4$, pour montrer l'influence des quatre paramètres les plus pertinents (temps de traitement osmotique, puissance microondes, température et vitesse de l'air de séchage) sur la qualité de l'ananas séché par combinaison de la déshydratation osmotique avec le procédé de séchage microondes/air chaud. La qualité du produit a été évaluée en termes d'aspect de la surface, de teneur en eau finale, de teneur en solides solubles, d'activité de l'eau, de fermeté, de couleur et de volume final.

## I.4- SYNTHESE ET CONCLUSION

Il ressort de cette étude bibliographique que la tomate est un fruit-légume très riche en micronutriments dont le lycopène, un antioxydant bénéfique pour la lutte contre certains cancers. Cependant c'est un produit rapidement périssable qui doit être préservé. L'utilisation des traitements thermiques et notamment du séchage solaire ou par air chaud pour sa préservation entraine généralement une dégradation de ses qualités organoleptique et nutritionnelle. Face à cette limite, l'utilisation d'une autre technique de séchage basée sur la technologie microondes a été étudiée par de nombreux auteurs pour l'intérêt qu'elle peut présenter du point de vue de l'amélioration de la qualité organoleptique et nutritionnelle du produit séché ainsi que dans la diminution de la consommation énergétique par rapport à un séchage par air chaud.

Toutefois l'utilisation d'une puissance microondes constante pendant toute la durée du séchage comme pratiqué par de nombreux auteurs peut poser des problèmes d'emballement thermique localisé, du fait du chauffage hétérogène inhérent au chauffage microondes, et se manifestant par l'apparition de zones carbonisées sur le produit. En effet, à puissance microondes constante la densité d'énergie apportée au produit augmente au cours du séchage car la masse du produit diminue. Ainsi en fin de séchage, un excédent d'énergie est transféré au produit, et ce, presque exclusivement sous forme de chaleur sensible.

Pour pallier ce problème, il apparaît indispensable de réaliser le séchage microondes à faible puissance, dans ce cas on perd le bénéfice de la rapidité que permet un séchage microondes, ou encore essayer de maîtriser l'apport d'énergie pendant toute la durée du séchage. Cette dernière stratégie a été utilisée par certains auteurs en mettant en place des systèmes de pilotage en

continu de la température du produit. Bien que les résultats obtenus par ces auteurs semblent satisfaisants, il nous apparaît toutefois que ce type de pilotage qui permet une rétroaction sur la puissance appliquée en fonction de la température du produit nécessite de connaître le profil de température « idéal » du produit au cours du séchage afin d'adapter la puissance appliquée à ce profil. Une telle régulation pourrait s'avérer relativement compliquée à mettre en œuvre au niveau industriel.

Par conséquent, l'objectif de ce travail est de privilégier une action sur la puissance microondes en l'adaptant à la masse du produit au cours du séchage. Ainsi, dans notre cas la consigne est donc la puissance microondes spécifique.

# 2ème partie : MATERIELS ET METHODES

## 2ème Partie : Sommaire

II.1- DESCRIPTION ET CARACTERISATION DU MATERIEL D'ETUDE ……..…44

II.1.1- DISPOSITIF EXPERIMENTAL……44

II.1.2- MATERIEL VEGETAL……53

II.2- DESCRIPTION DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL ……58

II.2.1- DIFFERENTES STRATEGIES DE SECHAGE……59

II.2.2- ANALYSE DES DONNEES ……60

II.3- MODELISATION ET OPTIMISATION DU SECHAGE MICROONDES AIR CHAUD..60

II.3.1- MODELISATION DE L'EVOLUTION DES TENEURS EN EAU REDUITES……60

II.3.2- OPTIMISATION DU SECHAGE MICROONDES AIR CHAUD DE LA TOMATE EN TERMES DE QUALITE ET DE CONSOMMATION ENERGETIQUE……62

# II.1- DESCRIPTION ET CARACTERISATION DU MATERIEL D'ETUDE

## II.1.1- DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le matériel expérimental est constitué d'un séchoir microondes pilote de laboratoire conçu par l'ex société MES Technologies (Microondes Energie Systèmes Technologies) (Villejuif, France). Ce pilote est combiné à un système qui apporte l'air chaud (figure 2.1 et 2.2).
Le dispositif est constitué globalement d'un générateur de microondes (magnétron) à puissance variable de 0 à 1860 W avec une fréquence de 2450 MHz. Les ondes électromagnétiques issues du magnétron traversent un guide d'onde (comprenant un adaptateur d'impédance) pour atteindre la cavité de séchage monomode (l'applicateur) où est placé l'échantillon à sécher, posé sur un plateau tournant en dessous duquel se trouve une balance électronique pour la mesure de la masse instantanée. Le système de ventilation à air convectif, situé au dessus du pilote est combiné à une résistance chauffante. Il permet d'amener l'air chaud à température voulue (déterminée par un thermocouple placé dans la conduite de l'air à l'entrée de l'applicateur) par le dessus de l'applicateur monomode. Une fibre optique passant par l'applicateur est introduite dans le produit pour l'enregistrement de sa température au cours du séchage. Deux wattmètres permettent l'enregistrement des puissances appliquée (ou incidente) et réfléchie.

### II.1.1.1-DESCRIPTIF DU SECHOIR PILOTE

Le séchoir microondes pilote de laboratoire utilisé est constitué des principales parties suivantes (figure 2.1 et 2.2) :



**Figure 2.1-** *Photo du séchoir microondes / air convectif pilote de laboratoire*

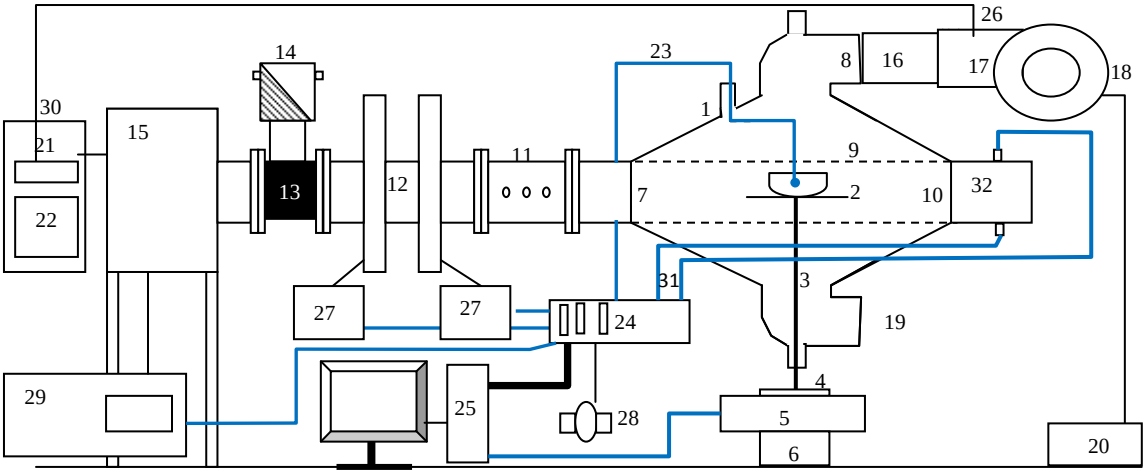


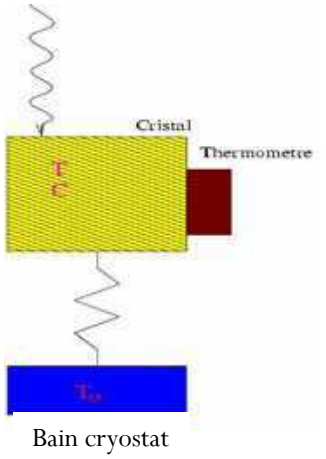

**Figure 2.2**– *Représentation schématique du système expérimental de séchage microondes-air convectif*

1, cavité de séchage ; 2, plateau tournant sous forme de filet en téflon posé sur un support en polypropylène (PP) en croix ; 3, tige tournante en PP ; 4, plaque tournante en acier inox ; 5, Balance électronique tournante ; 6, système rotatif ; 7, entrée des microondes (en Téflon) dans la cavité ; 8, arrivée de l'air ventilé ; 9, grille métallique de protection contre la sortie des microondes ; 10, sortie des microondes (en Téflon) de la cavité ; 11, guide d'onde avec adaptateur d'impédance ; 12, coupleur directif ; 13, circulateur d'ondes ; 14, 32, piège à eau ; 15, magnétron ; 16, tuyau de conduite d'air ; 17, résistance chauffante ; 18, ventilateur ; 19, ouverture pour sortie de l'air humide ; 20, variateur de la vitesse de l'air ; 21, régulateur PID de la température ; 22 compteur d'énergie électrique ; 23, fibre optique ; 24, centrale d'acquisition des données ; 25, P.C. ; 26, PT100 ; 27, wattmètres pour la mesures des puissances appliquées et réfléchies ; 28, débitmètre électromagnétique ; 29, générateur électrique ; 30, coffret électronique ; 31, thermocouples .

- ***un magnétron*** (15), qui crée les champs électromagnétiques nécessaires à l'induction des microondes ;

- ***deux coupleurs directifs*** (12), sur lesquels sont fixés des bolomètres (HP 8482 A) permettant de capter un millionième de la puissance des ondes incidentes et réfléchies. Les bolomètres sont reliés à deux wattmètres (27) (HP 435 B) pour les mesures des puissances incidente et réfléchie.

  Un bolomètre est un détecteur d'énergie, constitué d'un absorbeur d'énergie (qui est exposé au rayonnement), d'un thermomètre qui permet de mesurer le changement de température de celui-ci, d'un lien thermique au point froid (le cryostat qui maintient le bolomètre à basse température) et d'une électronique de mesure externe au bolomètre (figure 2.3).




*L'absorbeur (cristal) convertit la puissance en chaleur. Le thermomètre voit sa résistance varier avec la température.*

**Figure 2.3-** *Schéma simplifiée du bolomètre (source :* **Bouchier *et al.*,** 2008)

Son principe de fonctionnement réside dans sa faculté de convertir en chaleur l'énergie reçue par le détecteur, qui se traduit par une élévation de température mesurable par un thermomètre. Le matériau utilisé à une résistance électrique qui change avec la température permettant ainsi de mesurer les variations d'impédance du détecteur, et donc l'énergie électromagnétique incidente. La résistance est ensuite mesurée par un système externe. En conclusion, la mesure thermique est le trait caractéristique du bolomètre par une variation de résistance électrique.

- ***un guide d'onde*** (11) qui permet de conduire les microondes jusqu'au produit. Ce guide d'onde est constitué d'un adaptateur d'impédance sous forme de tige métallique dont l'enfoncement plus ou moins profondément dans des trous dans le guide d'onde permet de modifier l'absorption de l'onde par le produit. Pour toutes nos expériences, cette tige a été réglée à un niveau fixe. Sur le guide d'onde et avant les coupleurs directifs, est intercalé le circulateur d'ondes (13) pour diriger les ondes réfléchies vers le piège à eau (14), en vue d'éviter une détérioration du magnétron et de mesurer la puissance réfléchie;

- ***un applicateur monomode*** (1), ou cavité de séchage, dont la cellule de base qui reçoit le produit est de forme parallélépipédique (270 mm de longueur, 150 mm de largeur et 87 mm de profondeur) surmonté d'un cône pyramidal au dessus et en dessous avec ouverture de part et d'autre pour laisser passer l'air humide.

- ***une sonde à fibre optique*** (23) de précision ± 0,5°C, reliée à une centrale Neoptix (24) (Neoptix Inc. Québec, CANADA) est utilisée pour le suivi de la température à l'intérieur du produit ; La fibre optique a été calibrée en utilisant un bain d'eau glacée et d'eau bouillante (annexe II).

- ***un châssis d'acquisition*** (NI cDAQ -9178) (24). C'est un châssis National Instrument CompactDAQ USB 8 emplacements, dans lequel on insère des modules d'acquisition (grâce à des interfaces série RS 232 (ou connecteur propriétaire)). Ce châssis assure la collecte, convertit et transfert les données à un programme Labview ® (de National Instrument) installé sur un ordinateur. Le châssis est relié à l'ordinateur par port USB 2.0.

- ***un système d'air convectif forcé*** (17-18) constitué :

  - d'un ventilateur lié à un variateur de vitesse pour faire varier la vitesse de l'air (0 à 10 m/s) (20) ;

  - et d'une résistance chauffante (SECOMAK Modèle 632 – puissance 0,37 kW) dont la température peut être régulée par un contrôleur PID à l'aide d'une sonde PT100 placée dans la conduite d'air juste à la sortie de la résistance.

- ***un débitmètre électromagnétique*** (28) (KOBOLD série MIK, Allemagne) avec affichage LCD. Il est doté d'une sortie analogique en courant (4-20 mA) qui est reliée au châssis d'acquisition. Les données du débitmètre enregistrées et la différence de température donnée par deux thermocouples montés en opposition de phase sur le piège à eau permettent de déterminer par bilan thermique la puissance réfléchie.

#### II.1.1.2- MODIFICATIONS APPORTEES AU PILOTE

Le pilote microondes de laboratoire (décrit plus haut) utilisé pour la réalisation des essais de séchage n'étant pas suffisamment instrumenté pour mener à bien les expérimentations de la thèse, nous avons procédé à un certain nombre d'adaptation de celui-ci (ex : suivi *in situ* de la masse du produit) et à l'installation de dispositifs de mesure des puissances incidentes et réfléchies (coupleurs directifs associés à des wattmètres). Ce chapitre décrit l'ensemble des modifications réalisées sur le pilote quant à l'ensemble des procédures de vérification et de calibration des chaînes d'acquisition mises en place, il est présenté en annexe II.

L'ancien système de pesée des échantillons, du pilote microondes, ne permettait pas au plateau rectangulaire (figure 2.5a), sur lequel l'échantillon était posé, de tourner dans la cavité de séchage *monomode*. Cette *cavité* ou *applicateur monomode,* ne permettant que la propagation de l'onde selon un seul mode (comme son nom l'indique) i.e. unidirectionnel (figure 2.6), ajouté au manque de rotation de l'échantillon, qui recevait les ondes en face au cours du séchage microondes, exposait ce dernier aux champs des ondes. Cela avait donc pour conséquence l'apparition régulière de points chauds au sein du produit.

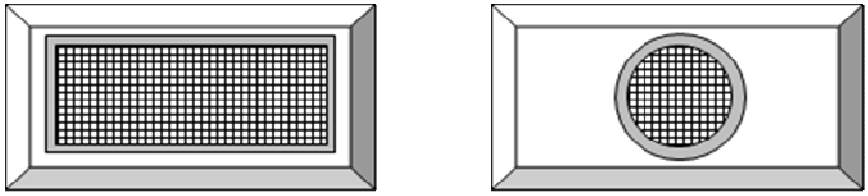


**Figure 2.4 – *a* :** *Ancien plateau porte échantillon dans l'applicateur monomode ; b : nouveau plateau porte échantillon dans l'applicateur monomode*

D'où la mise en place d'un plateau circulaire (figure 2.4b) pouvant aisément tourner au sein de la cavité, grâce à un dispositif rotatif sur lequel la balance est posée. La balance est reliée au plateau tournant par le biais d'une barre métallique traversant la cavité, permettant désormais de suivre la masse du produit *in situ* (figure 2.5).

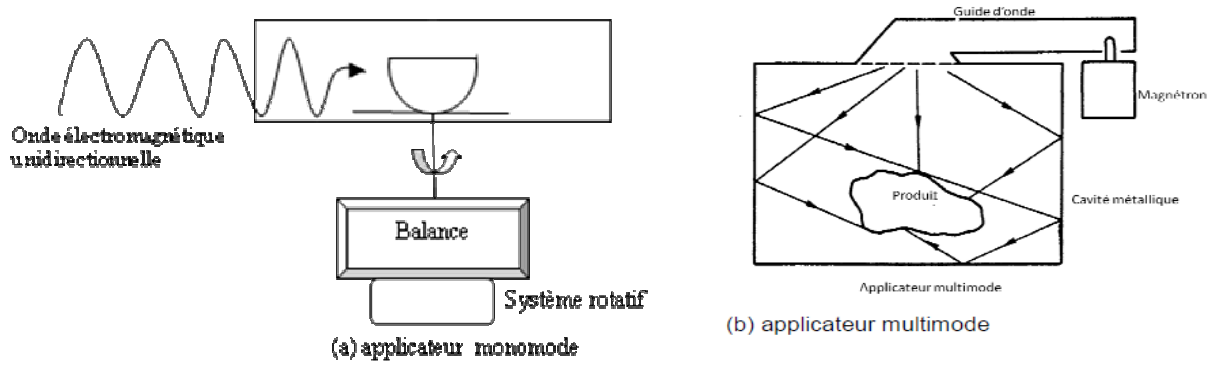



**Figure 2.5 -** *Propagation de l'onde électromagnétique dans un applicateur monomode combiné au système de pesée rotatif (a), à la différence de l'applicateur multimode (b)* (**Callebaut,** 2007) *où plusieurs modes de propagation de l'onde arrivent sur l'aliment et dans toutes les directions.*

- Au niveau du coffret d'alimentation du générateur microondes (magnétron), les affichages permettant de donner la puissance incidente et le pourcentage de réflexion des ondes devaient être vérifiés afin de valider les données affichées.

Initialement, l'installation d'un débitmètre électromagnétique a été réalisée pour mesurer le débit d'eau au niveau du piège à eau. Ce qui a permis, grâce aux thermocouples placés à l'entrée et à la sortie du piège à eau, de calculer par un bilan thermique la puissance de l'onde réfléchie.

Ensuite deux wattmètres reliés à deux coupleurs directifs ont été installés entre le guide d'onde et le magnétron. Le premier coupleur directif sur lequel est fixé un bolomètre permet à l'un des wattmètres de mesurer la puissance incidente, et le second coupleur directif fixé à un deuxième bolomètre permet au second wattmètre de mesurer la puissance réfléchie.

### II.1.1.3- PARAMETRES REGLABLES DU SECHOIR

#### II.1.1.3.1-Puissances microondes appliquée

La variation de puissance émise par le magnétron peut être obtenue, soit par variation de la tension appliquée au magnétron, soit par variation de courant de l'électroaimant. Dans notre cas c'est la variation de la tension appliquée au magnétron qui est utilisée. Cette puissance microondes appliquée ($P_{ap}$) peut être réglée en manuel, directement sur le générateur électrique en y introduisant un coefficient consigne x déterminé par la relation :

$$x = \frac{P_{ap} + 40{,}781}{19{,}018}\,. \qquad (2.1)$$

La valeur du coefficient *x* mis en consigne permettra d'appliquer la puissance voulue. En général on travaille avec des puissances spécifiques (*Ps*) (en W/g) souhaitées.

#### II.1.1.3.2-Température de l'air de séchage

La température de l'air issue du système de ventilation est réglée par action sur une résistance chauffante (SECOMAK Modèle 632 – puissance 0,37 kW) qui est reliée à une alimentation électrique. Un régulateur PID permet de réguler la température de l'air commandée pouvant varier entre 30 et 180°C.

#### II.1.1.3.3-Vitesse de l'air de séchage

Le variateur de vitesse (LANGLOIS, Gradignan) permet de faire varier de façon continue la vitesse du ventilateur (SECOMAK Modèle 513) par le biais d'un moteur (DUCHI Motor ; Type 71/2 – Puissance 0,37 kW) et donc la vitesse de l'air de séchage. Ce variateur est constitué d'un redresseur régulé avec un onduleur à commutation forcée qui permet de modifier la vitesse du ventilateur en jouant sur la fréquence d'alimentation du moteur. Sa gamme de variation se situe entre 0 et 250 unités qui correspondent aux vitesses comprises entre 0 m/s et 10 m/s au milieu de l'applicateur microondes.

### II.1.1.4- PARAMETRES MESURABLES DU SECHOIR

#### II.1.1.4.1-Puissances appliquée (ou incidente), puissance réfléchie et puissance transmise

La puissance appliquée ($P_{ap}$) effectivement au produit et celle réfléchie ($P_r$) par le produit sont mesurées à l'aide des deux wattmètres HP 435 B (AGILENT HP) combinés chacun à un coupleur directif via deux sondes ou bolomètres (HP 8482A, sensibilité : -25 dBm à +20 dBm); Quand à la puissance transmise par le produit, elle est déterminée par calorimétrie, en mesurant :

- le débit d'eau ($\dot{m}$) au niveau du piège à eau (situé en aval de l'applicateur) à l'aide d'un débitmètre électromagnétique (présenté ci-dessus),

- et la différence température ($\Delta\theta$) de l'eau à l'entrée et à la sortie de ce piège à eau à l'aide de deux thermocouples de type T.

On évalue donc la puissance transmise par la relation :

$$P_{tr} = \dot{m} C_{pe} \Delta\theta \qquad (2.2)$$

Ce qui permet de déterminer la puissance absorbée ($P_{ab}$) par le produit par la relation :

$$P_{ab} = P_{ap} - P_r - P_{tr} \qquad (2.3)$$

#### II.1.1.4.2-Température de l'air de séchage

Il s'agit ici de la température de l'air chaud convectif forcé apporté pour aider le séchage microondes. Cette température est mesurée à l'aide d'un thermocouple Cuivre/Constantan (précision $\pm$ 0,5°C) à l'entrée de la cavité de séchage.

#### II.1.1.4.3- Température du produit

Cette mesure est réalisée au centre du produit à l'aide d'une sonde à fibre optique (Neoptix Inc., Québec Canada) introduite par une ouverture (prévue) au dessus de la cavité de séchage. La fibre est reliée à une centrale Neoptix-Reflex (incertitude $\pm$ 0,5 °C entre 0-200°C) qui ensuite transfère les données enregistrées à l'ordinateur.

#### II.1.1.4.4-Perte de masse du produit

Elle est suivie par l'intermédiaire d'une balance SARTORIUS CPA 6202S de portée 6200 g avec une précision de 0,01 g et munie d'une interface RS 232. Relié directement au PC, l'acquisition des données se fait via un VI de LabView spécialement conçu par SARTORIUS.

Tous les capteurs permettant les différentes mesures (sauf la balance) sont donc directement reliés au châssis d'acquisition (NI cDAQ).

### II.1.1.4.5- Consommation énergétique au cours du traitement

Le séchage de produits alimentaires qui est un processus du transfert simultané de chaleur et de masse, représente une opération consommatrice d'énergie au niveau industriel. Dans le cas de cette étude, une évaluation de la consommation énergétique massique total (CEM) est réalisée en se basant sur la mesure de l'énergie électrique consommée au niveau du réseau au cours du séchage microondes assisté par l'air chaud.

#### Mesure de la consommation d'énergie électrique

La consommation de l'énergie électrique est déterminée en fin de séchage, c'est-à-dire lorsque la teneur en eau finale au sein du produit atteint 22 ± 3 % d'humidité finale. La valeur du kilowattheure (kWh) consommée est relevée sur un compteur d'énergie électrique situé dans le coffret électrotechnique (22) (figure 2.1). La lecture de l'énergie électrique consommée en kWh permet d'évaluer l'énergie totale consommée ($E_{tot}$) au cours du séchage par la relation :

$$E_{tot} = n_{kwh}\ 3600 \qquad \text{en kJ} \qquad (2.4)$$

$n_{kwh}$ : nombre de kWh consommé, 3600 représente le nombre de seconde en une heure.

#### Evaluation de la consommation énergétique massique totale (CEM)

A partir de l'énergie totale consommée en kJ (Eq. 2.2), on évalue la consommation énergétique spécifique totale ($CEM$) au cours du séchage microondes/air chaud par la relation :

$$CEM = \frac{E_{tot}}{M_e} \qquad \text{en kJ/kg d'eau évaporée} \qquad (2.5)$$

$M_e$ : masse d'eau éliminée au cours du séchage en kg.

### II.1.1.5- ACQUISITION ET COMMANDE DE LA PUISSANCE APPLIQUEE

Le pilotage de la puissance spécifique est réalisé par l'intermédiaire du micro-ordinateur (Acer) et du châssis d'acquisition:

- le PC est muni d'un port série RS 232 qui est utilisé pour l'acquisition de la masse,
- le châssis d'acquisition est connecté à l'ordinateur par un port USB 2.0 et constitué de 9 ports RS 232 (fiches mâles) où l'on peut encastrer des modules d'acquisition NI (de

National Instrument) comportant eux aussi des interfaces série RS 232 (fiches femelles). 5 des 9 ports sont utilisés dont 4 par les modules d'acquisition des entrées analogiques et 1 par le module de commande des sorties analogiques.

MODULES D'ACQUISITION

- **Module NI 9211** : c'est un module pour thermocouples constitué de 4 voies d'entrée analogiques (tous en précision 24 bits soit un millionième) et programmable en 0-80 mV. Il supporte le montage en opposition des thermocouples de l'entrée et de la sortie du piège à eau et le thermocouple qui mesure la température de l'air.

- **Module NI 9201 :** le NI 9201 est un module d'entrée analogique 8 voies (de précision 12 bits soit 1/4000) et programmable en 0-10 V. Il supporte les 4 fibres optiques du Neoptix (dont une seule est utilisée) et les deux wattmètres.

- **Module NI 9203 :** c'est un module d'acquisition de données avec 8 voies d'entrée analogiques de courant (de précision 16 bits). Il est programmable en 0-20 mA et supporte le débitmètre électromagnétique qui a une sortie analogique courant.

MODULE DE COMMANDE

- **Module NI 9269 :** Ce module NI 9269 est constitué de 4 sorties analogique en ±10V utilisé pour le contrôle commande. Une des sorties de ce module est lié à l'entrée analogique (0-10V) du générateur microondes permettant ainsi la commande du générateur à partir du programme LabView.

### II.1.1.5.1-Diagramme de pilotage

Le pilotage de la puissance spécifique est réalisée en adaptant la puissance appliquée à la proportionnelle de la masse à l'aide d'un programme développé sous LabView (National Instrument Inc), à partir de la formule :

$$P_{ap} = P_s . m_p \qquad (2.6)$$

$P_s$ : puissance spécifique à appliquer (W/g)

$m_p$ : masse du produit (g).

Les commandes de puissances émises sont le résultat de tensions commandées au générateur microondes. Pour réaliser la commande de la puissance appliquée, un étalonnage a été réalisé

entre la tension à commander (à partir du PC) et la puissance appliquée réelle (notée sur le wattmètre) (voir annexe II). Cela permet de déterminer la tension à envoyer au magnétron pour la commande de la puissance appliquée souhaitée. La relation obtenue au cours de l'étalonnage qui est la suivante :

$$P_{ap} = 210{,}04.U - 60{,}20 \qquad (2.7)$$

Avec :

$U$ : tension de sortie (V) ;

$P_{ap}$ : puissance appliquée (W),

Le programme de pilotage permet un dialogue avec le générateur microondes via le châssis d'acquisition et la balance via une liaison RS232. La figure 2.6 présente le diagramme des différents dialogues entre le PC, le générateur microondes et la balance.

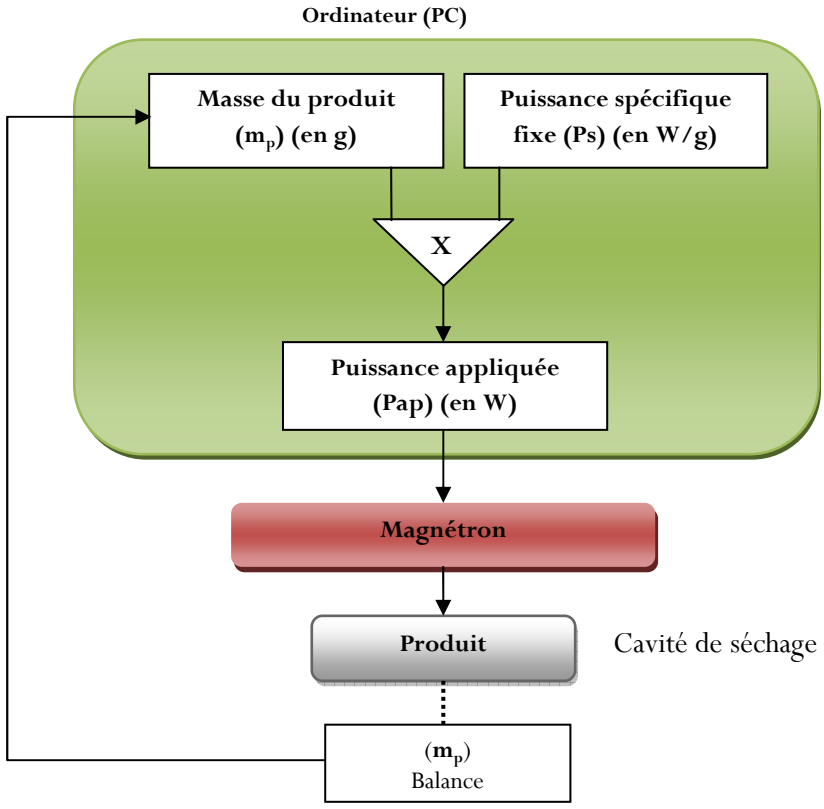



**Figure 2.6-** *Diagramme de pilotage de la puissance spécifique au cours du séchage.*

### II.1.1.5.2-Lancement d'un essai de séchage

Un essai de séchage est subordonné au remplissage de l'interface de la « face d'acquisition » du programme VI (Virtuel Instrument) de LabView. Il sert à entrer les conditions de séchage de

l'essai, notamment la puissance spécifique consigne, la masse initiale du produit et la durée d'intermittence ( ou la fréquence) de l'adaptation de la puissance appliquée.

## II.1.2- MATERIEL VEGETAL

### II.1.2.1-CHOIX DE LA VARIETE DE TOMATE

La tomate utilisée est une variété commerciale de type « ronde » achetée au niveau local dans un supermarché. Elle appartient à l'espèce *Solanum licopersicum L.* Les tomates rondes choisies sont de diverses origines (France, Espagne, Maroc) avec un calibre moyen compris entre 47/49 mm de diamètre et un poids moyen compris entre 95 et 110 g.
Par ailleurs, 25 échantillons de deux types de tomates commerciales séchées ont été utilisés (comme référence) afin de faire la comparaison avec la tomate séchée de l'étude : la tomate d'origine italienne dont la variété est de type "allongée" et la tomate ivoirienne dont la variété est de type "ronde".

### II.1.2.2-PREPARATION DE L'ECHANTILLON

Au laboratoire les tomates sont conservées dans le bac à fruit du réfrigérateur à 4°C avant les expériences. Lors des essais de séchage, aux microondes combinés à l'air chaud, la tomate est sortie du réfrigérateur et laissée à l'air libre, environ 45 minutes, pour amener la température du produit de 4°C à 20 ± 3°C. Le taux d'humidité initiale (base humide) des produits est en moyenne de 94,5 % ± 1 qu'il faut ramener après séchage à 22 % ± 3 (**CEE-ONU**, 2007). Ce taux humidité de la tomate fraîche est mesuré à chaque essai grâce à un analyseur d'humidité (Moisture Analyzer MJ33) pour avoir une idée de la matière sèche (par rapport à l'essai en cours), puis à l'étuve à 105°C pendant 24 heures (AOAC, 1990) sur trois échantillons de 5 ± 0,5 g d'une demi-tomate broyée. L'essai de séchage est réalisé sur une demi-tomate, coupée dans le plan médian. L'autre demi-tomate sert aux mesures des qualités physique et chimique initiales (couleur, texture, structure, teneur en Lycopène).

### II.1.2.3-CARACTERISATION DU MATERIEL VEGETAL

#### II.1.2.3.1-Détermination de la teneur en eau

Pour la détermination de la teneur en eau, la seconde demi-tomate fraîche est utilisée. Elle est broyée à l'aide d'un mixeur jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène. Une capsule à vide en acier inoxydable préalablement séchée à 105°C pendant 15 min, est pesée ($M_c$ en g) à l'aide d'une balance (SARTORIUS MC 410S ; portée 410 g – précision ± 0,0001 g). La tare est faite avec la capsule, et environ 5 g d'échantillon ($M_0$ en g) de tomate broyée sont pesés, dans cette

dernière. Le tout est placé (capsule + échantillon) dans une étuve à sécher (MEMMERT LM 100-800, Beschickung) à 105 °C pendant 24 heures (**Zidani**, 2009). Ensuite on pèse la capsule avec l'échantillon séché ($M_1$ en g). On détermine alors la masse de la matière sèche par la relation :

$$M_s = M_1 - M_c \quad \text{(en g)} \qquad (2.8)$$

Ce qui permet de déterminer la teneur en eau initiale en base sèche et humide respectivement par les relations :

$$X = \frac{(M_0 - M_1 + M_c)}{(M_1 - M_c)}.100, \text{ (\% kg d'eau/kg de Ms)} \qquad (2.9)$$

$$X_h = \frac{(M_0 - M_1 + M_c)}{M_0}.100, \text{ (\% kg d'eau/kg de produit)} \qquad (2.10)$$

Et la teneur en matière sèche du produit est déterminée par la formule :

$$\%MS = 100 - X_h \qquad (2.11)$$

### II.1.2.3.2-Interprétation des mesures de masse

L'enregistrement de la masse humide $M_h$ (t) du produit séché au cours du temps, permet de déterminer la teneur en eau réduite *Xr* (grâce à la connaissance de la masse de matière sèche du produit *Ms* et de la masse humide initiale $M_h(0)=M_0$) comme suit:

$$Xr = \frac{M_h(t) - M_s}{M_h(0) - M_s} \qquad (2.12)$$

Cette définition de *Xr* correspond à une simplification, car elle suppose que la teneur en eau finale (ou d'équilibre) pourrait être nulle comme le supposent certains auteurs (**Özbek & Dadali**, 2007 ; **Karaaslan & Tunçer**, 2008 ; **Al-Harahsheh, Al-Muhtaseb, & Magee**, 2009). La vitesse de séchage $dX/dt$ est déterminée par un ajustement successif de cinq (5) points de la courbe $X = f(t)$ par un polynôme d'ordre 2 : c'est la méthode du polynôme glissant ou du point mobile. La vitesse au point médian est obtenue par dérivation de ce polynôme. (**Benhamou *et al.,*** 2008). Un programme réalisé sur Excel avec des macros a permis le calcul de la vitesse de séchage.

### II.1.2.3.3-Mesure des indicateurs de qualité physique des produits

#### Couleur

La mesure de la couleur de la tomate est réalisée avant et après le séchage. Elle est mesurée à l'aide d'un colorimètre (KONICA MINOLTA CR400, Japon) utilisant le système CIE Lab et calibré avec une plaque standard blanche (L* 97,99, a* -0,02 b* 0,23). Les mesures de la couleur ont été réalisées sur la tomate broyée et placée soigneusement dans une coupelle en

acier inoxydable jusqu'à ras bord avant la prise de la mesure. Sur chaque échantillon 4 mesures des paramètres L*, a* et b* ont été réalisées et les valeurs des paramètres C*, a*/b*, $h°$, sont calculées comme suit :

✓ $C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$ (2.13)

L'indice C* représente la saturation de la couleur. Elle définie la vivacité (pureté) d'une couleur. La saturation varie des couleurs vives aux couleurs ternes et augmente ou diminue par rapport au point central (figure 2.8).

✓ $\frac{a^*}{b^*}$ (2.14)

est le ratio de couleur qui indique essentiellement l'obscurcissement du produit. Lorsque les valeurs sont basses cela signifie que le produit est moins obscure (**Tulasidas, Raghavan, & Norris**, 1993). Ce ratio selon (**Sacilik, Keskin, & Elicin,** 2006) représente la qualité de la couleur et doit être la plus basse possible en termes de propriété de couleur désirée pour la tomate.

✓ La tonalité (ou teinte) de la couleur $h°$ se définie comme la roue de la couleur (figure 2.7) avec le rouge pourpre à un angle de 0°C, jaune à 90°C, vert-bleuâtre à 180°C, bleu à 270 °C. Sa formule est :

$$h° = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (2.15)$$

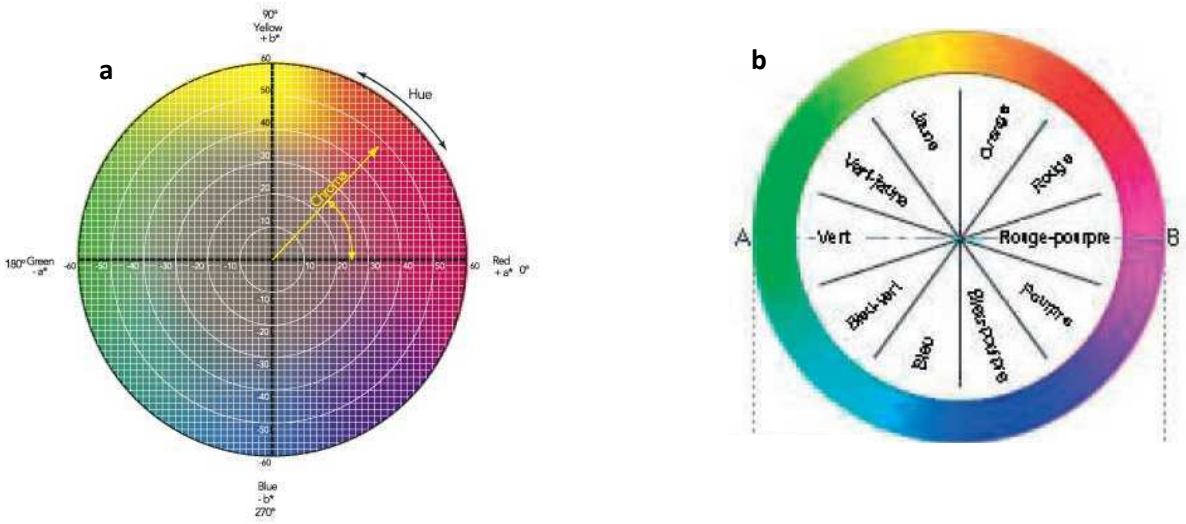



**Figure 2.7- a-** *Représentation de l'angle de teinte (h°) et de la saturation ou chroma (C)* **b** *Différentes couleurs de teintes en fonction des angles* (**Minolta KONIKA,** 2003).

### Texture

Avant le broyage de la demi-tomate fraîche et séchée, la fermeté des échantillons de tomate est déterminée par un test de pénétration en utilisant un analyseur de texture ou texturomètre (TA.XT. Plus, System Micro stable, UK). Pour les tomates commerciales séchées, Ce test est réalisé à l'aide d'un module cylindrique en acier inoxydable de Ø 4 mm, à une vitesse de pénétration de 1,5 mm/s et une distance de pénétration de 10 mm. La demi-tomate fraîche ou séchée est directement placée sur la table du texturomètre pour le test. Cependant la tomate séchée (dont l'épaisseur est inférieure à 10 mm) est placée sur un cylindre creux (35 x 22 mm : longueur x diamètre) avec comme diamètre du creux 11 mm. Le test est répété 4 fois sur le même échantillon. Ensuite est évalué le rapport de la force maximale de pénétration de la tomate séchée et de celle de la tomate fraîche, comme l'indique la formule suivante **(Heredia, Barrera, & Andrés**, 2007):

$$\sigma = \frac{F_{\max TS}}{F_{\max TF}} \text{ (-)} \qquad (2.16)$$

Avec $F_{maxTS}$, la force maximale de perforation de la tomate séchée (en N) et $F_{maxTF}$, celle utilisée pour perforer la tomate fraîche (en N).

Lorsque $\sigma = 1$ , cela signifie qu'il n'ya pas de changements mécaniques notables de la tomate séchée comparée à la tomate fraiche. Si $\sigma < 1$, alors la tomate séchée a été ramollie au cours du traitement. Cependant si $\sigma > 1$, alors la tomate séchée s'est raffermie (ou durcie) au cours du traitement.

Il faut noter par ailleurs que, dix échantillons de tomate fraiche de type "allongée" ont été utilisés pour la mesure de $F_{maxTF}$ de la tomate commerciale italienne. Quant à la tomate commerciale ivoirienne, puisqu'elle est de type "ronde" comme celle de l'étude, nous avons utilisé la moyenne des $F_{maxTF}$ de tous les échantillons de tomate frais de l'étude.

### Structure

Un Microscope Electronique à Balayage (MiniMEB TM 1000, Hitachi) a été utilisé pour analyser la structure interne (à l'échelle millimétrique et submicronique) des tomates avant et après séchage. Le MEB petit format est aussi simple qu'un microscope otique et aussi performant qu'un microscope électronique standard. Il fonctionne en mode "pression contrôlée". Utilisé pour des observations d'échantillons fins, massifs, secs, gras, hydratés, *sans préparation préalable* avec des agrandissements possibles jusqu'à x10.000. Les échantillons de tomate crue et séchée sont simplement découpés en lamelles de fines couches à l'aide d'un scalpel et posés dans la chambre d'observation.

### II.1.2.3.4-Mesure du taux résiduel en lycopène

#### Détermination de la teneur en lycopène résiduel

Le principe est basé sur l'extraction du lycopène par des solvants organiques (hexane, acétone et méthanol) suivi d'une mesure spectrophotométrique. Cette dernière est basée sur des mesures d'absorbance suivi de calculs basés sur le coefficient d'extinction molaire du lycopène à 502 nm dans l'hexane.

La teneur en lycopène des tomates avant et après séchage, a été déterminée en mesurant l'absorbance par le biais d'un spectrophotomètre UV-Visible (JENWAY 6705 UV-Visible). Le protocole de mesure de l'absorbance est donné en annexe III. La teneur en lycopène exprimée en mg/kg de tomate, est donnée par la formule suivante (**Fish, Perkins-Veazie, & Collins**, 2002); (**Kong & Ismail**, 2011):

$$C_{lyc}(mg/kg) = \frac{Abs_{502}.F_d.10^6.M_{Lyc}.V_d}{\varepsilon_{Lyc(502)}.1000.m_{ech}} \qquad (2.17)$$

Où : $Abs_{502}$ = absorbance ou densité optique (DO) de l'échantillon,

$F_d$ = facteur de dilution qui est de 5 dans notre cas,

$M_{Lyc}$ = masse molaire du lycopène ($C_{40}H_{56}$) : 536,87 g.mol$^{-1}$

$V_d$ = volume d'hexane d'extraction (mL) qui est de 10 mL.

$\varepsilon_{Lyc}$ = coefficient molaire d'extinction du lycopène à 502 nm en hexane : 158500 L.mol$^{-1}$.cm$^{-1}$ (**Zechmeister *et al***, 1943)

$m_{ech}$ = masse de l'échantillon (g)

La relation (2.15) devient alors :

$$C_{lyc}(mg/kg) = \frac{Abs_{502}.5.10^6.536,87.10}{158500.1000.m_{ech}} = \frac{Abs_{502}.169,36}{m_{ech}} \qquad (2.18)$$

#### Détermination du taux résiduel en lycopène

Le taux résiduel de lycopène (Lyc_rés.) est évalué en pourcentage en faisant le rapport de la teneur en lycopène du produit séché $C$ (en mg/g de MS) et de la teneur en lycopène du produit frais $C_0$ (en mg/g de MS) :

$$Lyc_rés. = \frac{C}{C_0} \cdot 100 \qquad (2.19)$$

Pour la tomate commerciale de référence italienne, trois des 10 tomates fraîches ont été utilisées pour la mesure de la teneur en lycopène initiale $C_0$. Quant à la tomate commerciale ivoirienne, la moyenne des $C_0$ de la tomate fraîche de l'étude a été utilisée, car les deux variétés sont identiques pour le type de forme.

## II.2- DESCRIPTION DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Dans le four microondes ménager, le séchage est réalisé en fixant manuellement, une puissance au générateur microondes. La puissance appliquée reste donc constante au cours du séchage, entrainant une augmentation de la puissance spécifique appliquée, car la masse du produit diminue. Ainsi en fin de séchage apparaissent des problèmes de carbonisation dus à un apport d'énergie supérieur à celui nécessaire pour le seul séchage dont la vitesse est limitée par l'écart de pression partielle de vapeur d'eau. C'est ce qui nous a amené à proposer deux stratégies (1 et 2) de séchage microondes/air chaud avec régulation de la puissance spécifique, présentées ci-dessous.

### II.2.1- DIFFERENTES STRATEGIES DE SECHAGE

#### II.2.1.1-STRATEGIE 1 : SECHAGE SANS REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE

Dans cette stratégie, le séchage de la demi-tomate a été réalisé en maintenant la puissance appliquée constante (sans ajustement), tout au long du processus : la puissance spécifique varie alors avec le temps. La température de l'air étant maintenue constante à 40°C, les puissances spécifiques appliquées sont de 1 - 1,5 - 2 - 2,5 W/g.

#### II.2.1.2- STRATEGIE 2 : SECHAGE AVEC REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE EN CONTINU

##### II.2.1.2.1- Mode 1 : Régulation de la puissance spécifique en continu chaque seconde

La demi-tomate est séchée en ajustant chaque seconde la puissance appliquée tout en maintenant constante la température de l'air : la masse enregistrée chaque seconde est utilisée pour recalculer la puissance à appliquer (à partir de la puissance spécifique fixe) que le PC commande au générateur microondes. Cela permet donc d'actualiser la puissance spécifique toutes les secondes, afin de la maintenir constante tout le long du processus. Les puissances spécifiques appliquées sont de 3, 5 et 7 W/g combinées aux températures d'air chaud de 30, 40 et 50°C.

##### II.2.1.2.2- Mode 2 : Régulation de la puissance spécifique par intermittence de 5 minutes

Des essais réalisés au cours d'une phase exploratoire ont permis de constaté que, 2 minutes pris comme fréquence d'adaptation de la puissance appliquée, ne permet pas d'observer nettement l'évolution de l'adaptation par intermittence de cette puissance appliquée (en escalier). Quant à,

l'adaptation de la puissance appliquée à 7 minutes, elle donne une demi-tomate vidée de sa pulpe (donc non analysable après le séchage). Par contre à 5 minutes de fréquence d'adaptation, on a des résultats acceptables.

Ainsi, dans ce mode de régulation, il s'agira de sécher la demi-tomate en ajustant par intermittence de 5 minutes, la puissance appliquée avec maintient de la température de l'air constante : la procédure est identique au mode 1, en faisant seulement varier le temps de régulation de 1 seconde à 5 minutes (300 sec.). Les puissances spécifiques appliquées sont de 3, 5 et 7 W/g combinées aux températures d'air chaud de 30, 40 et 50°C.

## II.2.2- ANALYSE DES DONNEES

### II.2.2.1-PRETRAITEMENT DES DONNEES BRUTES

Les données brutes obtenues par seconde sont pré-analyées à l'aide d'un code ou programme conçu avec le logiciel Matlab 7.5.0 - 2007b (The Mathworks Inc., MA, USA). Ce programme permet de faire la moyenne lissée des données enregistrées sur une base de 60 secondes, i.e., faire la moyenne lissées sur les 60 points successifs (**Li, Raghavan, & Orsat**, 2010a).

### II.2.2.2- ANALYSES STATISTIQUES

Chaque essai expérimental de séchage est répété 3 fois et une valeur moyenne des essais est rapportée. Pour les données relatives à la qualité du produit (la couleur, la texture et l'absorbance pour la détermination de la teneur en lycopène), chaque essai a fait l'objet de 3 à 4 lectures pour donner une moyenne de l'essai. Et chaque essai a été répété trois fois et une valeur moyenne des essais a été rapportée. L'écart-type est représenté sous forme de barre d'erreur sur les figures.

Pour l'analyse des effets des paramètres (puissance spécifique et température) sur les indicateurs de qualité (couleur, texture, taux résiduel de lycopène), nous avons utilisé l'analyse de la variance (ANOVA) pour comparer les moyennes obtenues pour chaque condition de séchage. C'est le logiciel Excel 2007 qui a été utilisé pour déterminer le seuil de significativité entre des moyennes. Les différences entre les moyennes sont identifiées comme significatives lorsque la *p-value* est inférieur à 0,05 et non significatives si la *p-value* est supérieure à 0,05.

## II.3- MODELISATION ET OPTIMISATION DU SECHAGE MICROONDES AIR CHAUD

### II.3.1- MODELISATION DE L'EVOLUTION DES TENEURS EN EAU REDUITES

Deux types de modèle ont été utilisés pour cette étude: le modèle de la diffusivité apparente de l'eau, et des modèles de représentation.

#### II.3.1.1-MODÈLES DE LA DIFFUSIVITÉ APPARENTE

Dans nombre de recherches les auteurs utilisent la diffusivité apparente de l'eau $D_{ap}$ pour analyser quantitativement et caractériser le séchage (**Al-Harahsheh, Al-Muhtaseb, & Magee,** 2009). Dans cette étude, nous utiliserons l'équation semi-empirique du modèle de la plaque infinie, solution analytique de la deuxième loi de Fick, développée par (**Crank**, 1975). Ainsi en supposant que : la distribution de l'humidité initiale est uniforme, et tend vers zéro au cours du temps, le transfert de l'eau se fait exclusivement par diffusion, et il n'y a pas de résistance aux transferts d'eau en surface, le rétrécissement du produit est négligeable, la diffusivité est constante et uniforme, alors la teneur en eau réduite moyenne évolue selon l'équation suivante:

$$Xr = \frac{8}{\pi^2}\exp\left(-\pi^2\frac{D_{ap}}{L^2}t\right) \text{ ou encore } Ln(Xr) = Ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \pi^2\frac{D_{ap}}{L^2}t \qquad (2.20)$$

qui est l'expression de la droite caractérisant l'allure asymptotique du séchage. Du tracé de l'évolution du logarithme de *Xr* on peut déduire la pente de la droite asymptote, soit $\pi^2\frac{D_{ap}}{L^2}$ , *L* étant l'épaisseur de l'échantillon de la demi-tomate.

Ce modèle ne permet pas de décrire l'ensemble du séchage et repose sur des hypothèses peu réalistes. Aussi nous ne l'utiliserons que pour comparer les résultats de nos travaux à ceux des auteurs ayant utilisé le même mode d'interprétation du séchage.

#### II.3.1.2-MODÈLES DE REPRÉSENTATION

Pour décrire l'allure de la courbe de séchage de la demi-tomate et déterminer l'équation empirique la plus adéquate, nous avons utilisé 6 modèles de séchage en couche mince, issus de la littérature (tableau 2.1).

**Tableau 2.1-** *Modèles appliqués à la description des courbes de séchage donnés par différents auteurs* (**Soysal, Oztekin, & Eren,** 2006)

| N° | Nom du modèle | Equation du modèle |
|---|---|---|
| 1 | Page (**Diamante & Munro,** 1993) | $Xr = \exp(-kt^n)$ |
| 2 | Logarithmique **(Yagcioglu, Degirmencioglu, & Cagatay,** 1999) | $Xr = a\exp(-kt) + c$ |
| 3 | Midilli–Kucuk (**Midilli, Kucuk, & Yapar**, 2002) | $Xr = a\exp(-kt^n) + bt$ |
| 4 | Deux termes (**Henderson**, 1974) | $Xr = a\exp(-k_1 t) + b\exp(-k_2 t)$ |
| 5 | Approche diffusionnelle (**Yaldyz & Ertekin**, 2001) | $Xr = a\exp(-kt) + (1-a)\exp(-kbt)$ |
| 6 | Henderson et Pabis modifié (**Karathanos**, 1999) | $Xr = a\exp(-k_1 t) + b\exp(-k_2 t) + c\exp(-k_3 t)$ |

*a, b, c*, coefficients et *n*, exposant spécifique de chaque équation de séchage; *k*, $k_1$, $k_2$, $k_3$ coefficients spécifiques de chaque équation de séchage, t est le temps de séchage.

Les paramètres statistiques utilisés pour apprécier la corrélation entre l'expérimentation et les modèles correspondants aux différentes équations sont les suivants :

- le coefficient de détermination ($R^2$) est l'un des premiers critères pour prévoir la meilleure équation qui décrit les courbes de séchage (**Boughali *et al.***, 2009).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(Xr_{pre,i} - \overline{X}_{pre,i})^2}{\sum_{i=1}^{N}(Xr_{\exp,i} - \overline{X}r_{\exp,i})^2} \qquad (2.21)$$

- le paramètre statistique khi-carré ($\chi^2$) est utilisé pour améliorer la précision de lissage. Ce paramètre est calculé par la formule :

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}(Xr_{\exp,i} - Xr_{pre,i})^2}{N - n_p} \qquad (2.22)$$

- la racine de l'erreur quadratique moyenne **(REQM**) est aussi utilisée pour améliorer la précision de lissage. Ce paramètre est calculé par la formule:

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Xr_{pre,i} - Xr_{\exp,i})^2} \qquad (2.23)$$

avec $Xr_{exp,i}$ qui représente la ième teneur en eau réduite, $Xr_{pre,i}$ qui est la ième teneur en eau prédictible, $\overline{X}r$ est la moyenne des teneurs en eau réduite, *N* est le nombre d'observation, $n_p$ est le nombre de constantes dans le modèle étudié.

Tous ces paramètres statistiques ainsi que les constantes de séchage et les coefficients des équations des modèles de séchage semi-empiriques ont été calculés en utilisant un programme, basé sur la régression non-linéaire simple, réalisé dans MATLAB R2007b (Inc., Massachusetts,

USA). De ce fait, le modèle le plus approprié à la description de l'allure de la cinétique de séchage de la demi-tomate est choisi selon les critères suivants: $R^2$ proche de l'unité et $\chi^2$ et REQM le plus faible possible (**McMinn**, 2006).

## II.3.2- OPTIMISATION DU SECHAGE MICROONDES AIR CHAUD DE LA TOMATE EN TERMES DE QUALITE ET DE CONSOMMATION ENERGETIQUE

### II.3.2.1- OBJECTIF DE L'ETUDE D'OPTIMISATION

Des essais exploratoires menés sur le séchage microondes/ air chaud de la tomate, ont montré que la régulation de la puissance spécifique (Ps) appliquée avec une intermittence de 5 minutes (mode de régulation 2 définie au paragraphe II.2.1.2.2) permet de réduire le temps de séchage et donc la consommation énergétique, mais entraîne une certaine dégradation de la qualité nutritionnelle (notamment la diminution du taux résiduel de lycopène) du produit final. La question qui peut se pose alors est : quelle est la durée optimale de l'intermittence pour obtenir une qualité (physico-chimique) appréciable du produit séché ?
L'objectif de cette étude est donc de trouver les facteurs optimaux (Puissance spécifique (Ps), durée d'intermittence de la régulation de Ps (DI), et température de l'air (Ta)) du procédé microondes combinés à l'air chaud, qui garantissent une qualité de la tomate séchée tout en réduisant la consommation énergétique. L'humidité finale de la tomate séchée devant se située à $22 \pm 5$ %.

### II.3.2.2- DESCRIPTION DU PROCEDE

La régulation du séchage MOAC se fait à partir d'un ordinateur grâce à un système de contrôle commande. A partir de la masse du produit obtenue par pesage *in situ*, la puissance microondes appliquée est régulée à la « proportionnelle » de la masse comme présenté à la figure 2.7 du paragraphe II.2.2.2.1.

### II.3.2.3- FACTEURS DE L'ETUDE

Pour cette étude, trois facteurs ont été retenus à savoir : la puissance spécifique (en W/g), la durée de l'intermittence (en s) pour la régulation de la puissance spécifique et la température de l'air chaud (°C) combiné aux microondes.

#### II.3.2.3.1- Puissance spécifique (Ps)

La puissance microondes facilite l'élimination de l'eau du produit lors du séchage ; il faut donc utiliser la puissance adéquate pour ne pas brûler le produit. Compte tenu des expériences de la

phase exploratoire, la puissance spécifique la plus élevée choisie est de 7 W/g et la plus basse est de 3 W/g.

#### II.3.2.3.2- Durée d'intermittence (DI)

Cette durée d'intermittence est le temps au terme duquel on modifie la puissance appliquée pour l'adapter à la masse afin de respecter la consigne de puissance spécifique. En un mot, le temps entre deux prises de masse, permettant la commande de la nouvelle puissance incidente calculée ($P_i$ (t) = $m_i$(t).Ps ; avec $m_i$(t) la masse instantanée du produit) à envoyer au générateur de microondes. Elle varie entre 1 et 300 secondes.

#### II.3.2.3.3- Température de l'air de séchage (Ta)

L'air de séchage, appliqué simultanément avec les microondes, a une température qui varie entre 30 et 50°C. Cette température contribue à l'élimination de l'eau du produit en agissant sur l'humidité relative de l'air mais joue également un rôle sur le refroidissement du produit notamment en fin de séchage.

#### II.3.2.4- CHOIX DU PLAN EXPERIMENTAL

Il existe plusieurs plans pour surfaces de réponses, notamment le plan composite, le plan de Box-Behnken et celui de Doehlert (tous des plans de second degré). Notre choix s'est porté sur le plan de Doehlert car, lorsque les objectifs recherchés ne sont pas atteints (c'est-à-dire l'obtention d'un point optimal qui sort du domaine expérimental), alors les résultats du premier plan permettront d'orienter les choix des niveaux des facteurs vers la bonne direction (Goupy, 2005) sans être obligé de reprendre tous les essais.
Nous nous attendons à des variables réponses (définis au paragraphe II.3.2.6) qui varient selon des fonctions du second degré. Aussi avons-nous opté pour le plan de Doehlert, qui permet d'explorer plus facilement le domaine expérimental, et est adapté à l'ajustement d'un modèle d'ordre deux pour facteurs quantitatifs. Il est économique et est spécialement adapté pour la prédiction et l'optimisation (**Govarerts & Leboulengé**, 2000).
Le plan de Doehlert est composé de $N=k^2+k+n_0$ essais (avec k le nombre de facteurs et $n_0$ le nombre d'essais au centre du domaine), dont $n=k^2+k+1$ points supports. $k^2+k$ essais sont disposés sur une sphère de rayon 1 (figure 2.8).

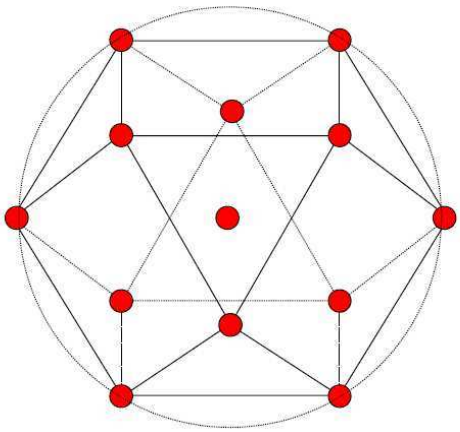


**Figure 2.8**- *Plan de Doehlert à 3 facteurs. Représentation dans l'espace*

Dans le cas de cette étude, k=3 facteurs et $n_0$ =3 points au centre soit un total de 15 essais à réaliser.

### II.3.2.5- DOMAINE DE L'ETUDE ET CONSTRUCTION DU PLAN EXPERIMENTAL DE DOEHLERT

Le plan classique de *Doehlert* à trois facteurs dont le premier varié entre -1 et +1, le second facteur varie entre -0,866 et +0,866 et le troisième entre -0,816 et +0,816. Cependant pour cette étude, nous avons opté pour un plan de *Doehlert* avec changement d'échelle dans le but de mieux couvrir un domaine expérimental cubique ([-1,+1]). Cette transformation permettra d'assurer de meilleurs prédictions dans les coins du domaine, mais au dépend des propriétés de symétrie du plan (les points ne seront plus disposés sur une sphère) (**Govarerts & Leboulengé**, 2000). Ainsi désormais, tous les facteurs varient entre -1 et +1. Ce qui permet d'avoir le tableau 2.2 suivant qui met en exergue ce changement d'échelle pour un plan de *Doehlert* à trois facteurs ($X_1$, $X_2$ et $X_3$).

**Tableau 2.2-** *Changement d'échelle pour un plan de Doehlert à trois facteurs*

| | Plan de base | | | | Plan modifié | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | -1 | 0 | 0 | 2 | -1 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 0 |
| 4 | -0,5 | -0,866 | 0 | 4 | -0,5 | -1 | 0 |
| 5 | 0,5 | 0,866 | 0 | 5 | 0,5 | 1 | 0 |
| 6 | -0,5 | 0,866 | 0 | 6 | -0,5 | 1 | 0 |
| 7 | 0,5 | -0,866 | 0 | 7 | 0,5 | -1 | 0 |
| 8 | -0,5 | -0,289 | -0,816 | 8 | -0,5 | -0,333 | -1 |
| 9 | 0,5 | 0,289 | 0,816 | 9 | 0,5 | 0,333 | 1 |
| 10 | -0,5 | 0,289 | 0,816 | 10 | -0,5 | 0,333 | 1 |
| 11 | 0 | -0.577 | 0,816 | 11 | 0 | -0,667 | 1 |
| 12 | 0,5 | -0,289 | -0,816 | 12 | 0,5 | -0,333 | -1 |
| 13 | 0 | 0,577 | -0,816 | 13 | 0 | 0,667 | -1 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 14 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 15 | 0 | 0 | 0 |

Pour exécuter les essais, il faut transformer les unités codées en unités normales comme présenté dans le tableau 2.3 qui met en exergue le domaine expérimental.

Trois essais aux points centraux ont été réalisés, pour obtenir une estimation de l'erreur expérimentale et diminuer l'erreur de prédiction autour du point central. Ce qui fait un total de 15 essais.

**Tableau 2.3-** *Domaine expérimental*

| Niveau | (1) Puissance spécifique (W/g) | (2) Durée d'intermittence (s) | (3) Température de l'air (°C) |
|---|---|---|---|
| -1 | 3 | 1 | 30 |
| 0 | 5 | 151 | 40 |
| 1 | 7 | 300 | 50 |
| Pas | 2 | 151 | 10 |

La relation entre le code et la valeur réelle (VR) étant : *VR = Pas x code + VRC (valeur réelle au centre),* on aura,

- pour la puissance spécifique Ps = 2 x code + 5
- pour la durée d'intermittence DI = 150 x code + 151
- pour la température Tp = 10 x code + 40

Ce qui permet de réaliser le tableau 2.4 (avec JMP.9), qui présente la construction du plan expérimental de *Doehlert* pour les valeurs réelles.

**Tableau 2.4-** *Valeurs réelles des essais du plan expérimental*

| Puissance spécifique (W/g) | Durée d'intermittence (s) | Température (°C) |
|---|---|---|
| 3 | 151 | 40 |
| 7 | 151 | 40 |
| 4 | 101 | 30 |
| 4 | 300 | 40 |
| 6 | 101 | 30 |
| 5 | 151 | 40 |
| 6 | 200 | 50 |
| 4 | 1 | 40 |
| 4 | 200 | 50 |
| 6 | 1 | 40 |
| 6 | 300 | 40 |
| 5 | 250 | 30 |
| 5 | 151 | 40 |
| 5 | 51 | 50 |

#### II.3.2.6- VARIABLES REPONSES

L'objectif de cette étude étant l'optimisation de la consommation énergétique et de la qualité du produit séché, les réponses choisies seront basées sur les paramètres process et qualité. Concernant les paramètres process, les réponses choisies sont :

- la consommation énergie massique (CEM) en kJ/kg d'eau évaporée
- et la durée de séchage (Ds) en minutes

Pour les paramètres de qualité, les réponses choisies sont :

- les paramètres couleur que sont la variation de la couleur rouge $\Delta a^*$, la saturation ou chroma (C*), la variation de l'angle de teinte $\Delta h°$,

- la fermeté du produit séché (Ferm) (qui est représenté par la force maximale de pénétration de la tomate séchée sur celle de la tomate fraîche)
- et le taux taux résiduel en lycopène (Lyc_rés).

**II.3.2.7- ANALYSE DES DONNEES**

Les résultats obtenus ont été traités de façon classique d'abord avec le logiciel JMP 9.0, puis avec le logiciel CORICO (**CORYENT Conseil**, 2009) afin de comparer les différents points optimaux trouvés. CORICO est un logiciel d'analyse de données mais qui permet également de concevoir et de traiter des plans d'expériences. Sa particularité par rapport aux logiciels classiques d'optimisation est qu'il ne considère pas de modèles *a priori* pour les réponses. En effet, il ne propose un modèle qu'après analyse des données du plan d'expériences. Ainsi, les modèles seront tous différents d'une réponse à l'autre. Une autre particularité de CORICO est qu'il ne propose pas de modèles quadratiques. En effet, il calcule des corrélations partielles entre les facteurs et les réponses et ne retient que celles qui sont significatives et non redondantes, c'est-à-dire qu'il s'assure que le lien existant entre deux variables est réel, donc non dépendant d'une troisième variable. Ainsi, seul les « vrais liens » seront considérés lors de la construction des modèles. Un lien correspond à la corrélation partielle entre une réponse et un facteur ou une interaction logique de facteurs. Les modèles construits seront donc des équations de régression dont les régresseurs sont des interactions logiques (ET, OU exclusif, SI,..) entre les facteurs. Pour mieux comprendre considérons un exemple de modèle possible avec CORICO. Soit Y une des réponses d'un plan d'expériences à deux facteurs $X_1$ et $X_2$. Un modèle CORICO pour cette réponse pourrait s'écrire :

$$Y = a_0 + a_1X_1*X_2 + a_2\,X_1\&X_2 + a_3\,X_1]X_2 - a_4X_1\&\text{-}X_2 \ldots\ldots\ldots \qquad (2.24)$$

Avec :

$X_1*X_2$ = interaction $X_1$ OU EXCLUSIVE $X_2$ ; la réponse Y est forte lorsque $X_1$ est fort et $X_2$ faible ou $X_1$ est faible et $X_2$ fort

$X_1\&X_2$ : interaction $X_1$ ET $X_2$ ; la réponse Y est forte lorsque $X_1$ et $X_2$ sont forts

$X_1]X_2$ : interaction $X_1$ MODULE par $X_2$ ; la réponse Y est forte lorsque $X_1$ est fort si $X_2$ est fort

$X_1\&\text{-}X_2$ : interaction $X_1$ ET NON $X_2$ ; la réponse Y est forte lorsque $X_1$ est fort et $X_2$ est faible

Les différentes interactions ci-dessus peuvent être schématisées comme suit (figure 2.9) :

$A \equiv X1$ et $B \equiv X2$

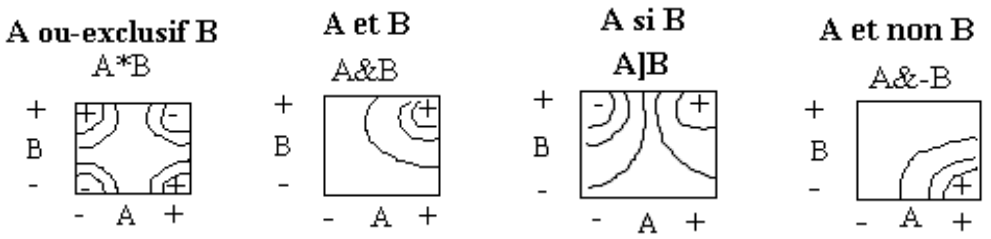



**Figure 2.9 -** *Illustration des différentes interactions*

*(Source : manuel du logiciel CORICO,* ***CORYENT Conseil****, 2009)*

Pour aboutir à ce modèle, CORICO analyse toutes les interactions possibles entre les facteurs, élimine toutes celles dont la corrélation partielle est inférieure à un certain seuil (modifiable) défini par défaut dans le logiciel, puis construit le modèle en commençant par le régresseur ayant la plus forte corrélation partielle avec la réponse, c'est-à-dire expliquant le plus la variance de la réponse, et ainsi de suite. Plus d'une dizaine d'interactions logiques peuvent être utilisées par CORICO, ce qui permet un nombre considérable de modèles éventuels pour représenter les données du plan d'expériences.

Il faut noter par ailleurs que bien que le logiciel CORICO propose des plans qui lui sont spécifiquement adaptés, il est capable de traiter toute sorte de plan d'expériences classiques. L'avantage de la méthode CORICO, c'est qu'elle n'exige pas l'indépendance (ou l'"orthogonalité") des facteurs et fonctionne en cas de fluctuation non maîtrisée de ceux-ci.

# 3ème partie : RESULTATS ET DISCUSSIONS

## 3ème Partie : SOMMAIRE

III.1- SECHAGE MICROONDE/AIR CHAUD SANS REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE (A PUISSANCE APPLIQUEE FIXE)……71

III.1.1- CARACTERISATION DU SECHAGE MICROONDES AIR CHAUD (MOAC) SANS REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE……71

III.1.2- EVALUATION DE LA QUALITE DE LA TOMATE SECHEE SANS REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE……75

III.1.3- CONCLUSION PARTIELLE……77

III.2- SECHAGE MICROONDE/AIR CHAUD AVEC REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE……78

III.2.1– CARACTERISATION DU SECHAGE MICROONDES/ AIR CHAUD AVEC REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE ……78

III.2.2 – COMPARAISON DU SECHAGE MOAC EN PILOTAGE CONTINU ET PAR INTERMITTENCE……105

III.3- MODELISATION ET OPTIMISATION DU PROCEDE DE SECHAGE MICROONDES /AIR CHAUD ……112

III.3.1- MODELISATION ET SIMULATION DU PROCEDE……112

III.3.2- OPTIMISATION DU SECHAGE MICROONDES AIR CHAUD DE LA TOMATE PAR LA METHODE CLASSIQUE ET CORICO……120

III.4- SYNTHESE DES RESULTATS……149

III.4.1- ASPECT PROCESS……149

III.4.2- ASPECT QUALITE……150

III.4.3- ASPECT OPTIMISATION ET MODELISATION……151

## III.1- SECHAGE MICROONDE/AIR CHAUD SANS REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE (A PUISSANCE APPLIQUEE FIXE)

Le séchage microondes assistés par air chaud a été réalisé sans régulation de la puissance spécifique (stratégie 1). Autrement dit, la puissance microondes imposée est restée constante pendant toute la durée du séchage. Après avoir caractérisé les différentes courbes de séchage réalisées aux différentes puissances spécifiques initiales, nous évaluerons et discuterons de l'impact de la variation de la puissance spécifique au cours du séchage sur la qualité du produit final.

### III.1.1- CARACTERISATION DU SECHAGE MICROONDES AIR CHAUD (MOAC) SANS REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE

#### III.1.1.1- INFLUENCE DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE SUR LES CINETIQUES ET VITESSES DE SECHAGE

Les figures 3.1 et 3.2 présentent respectivement, l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps et l'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau, pour différentes puissances spécifiques et à température d'air constante, égale à 40°C. Les cinétiques de séchage présentent une allure relativement classique. On remarque toutefois, que l'effet de la puissance spécifique sur la cinétique de séchage dépend du niveau de celle-ci.

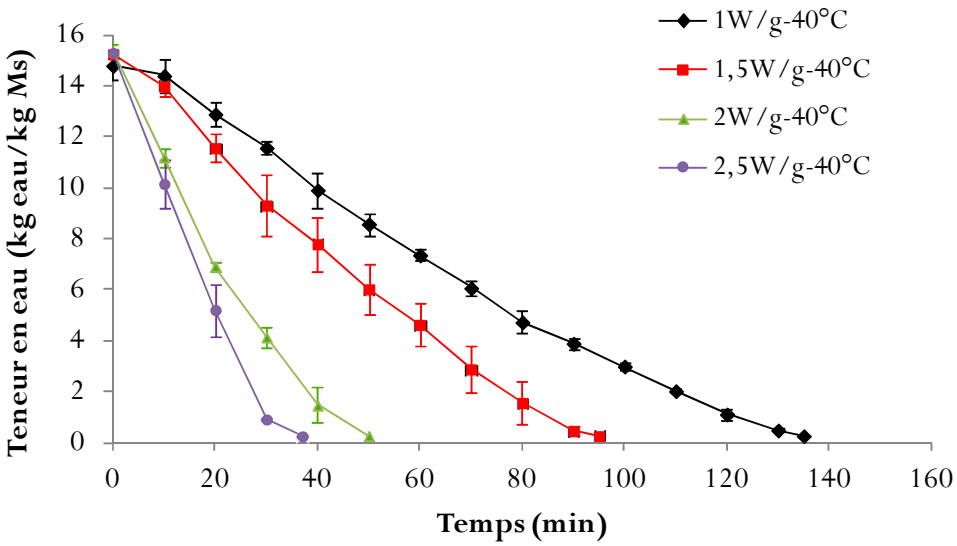



**Figure 3.1**- *Variation de la teneur en eau de la demi-tomate en fonction du temps à différentes conditions de séchage (MOAC).*

En effet, un incrément de 0,5 W/g à basse puissance spécifique (passage de 1 à 1,5 W/g) semble avoir un effet plus important qu'à plus forte puissance spécifique (passage de 2 à 2,5W/g).
L'influence est aussi révélée au niveau du temps de séchage qui est réduit lorsque le niveau de puissance est plus important.

On retrouve cette différence de l'effet du niveau de puissance spécifique sur la vitesse de séchage représentée à la figure 3.2 en fonction de la teneur en eau. L'examen de cette figure, nous révèle en effet trois phases bien identifiées pour les faibles puissances spécifiques (1 et 1,5 W/g) à savoir une phase de mise en température au cours de laquelle la température de surface de la tomate augmente jusqu'à la température d'ébullition de l'eau à pression atmosphérique, suivie d'une phase à vitesse constante, enfin une phase de ralentissement durant laquelle la vitesse de séchage chute brutalement.

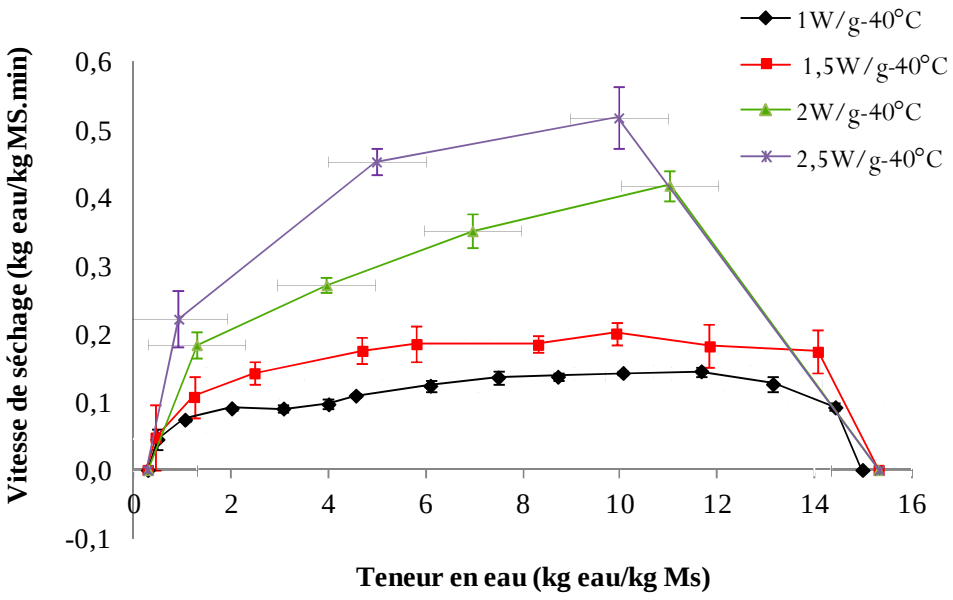



**Figure 3.2**- *Variation de la vitesse de séchage de la demi-tomate en fonction de la teneur en eau à différentes conditions de séchage MOAC*

Ce résultat est conforme avec ceux de la littérature. En effet **Alibas**, (2007) et **Al-Harahsheh, Al-Muhtaseb, & Magee** (2009) l'ont signalé respectivement pour le séchage par microondes de tranches de potiron et de pulpe de tomate. Par contre pour les puissances spécifiques élevées (2 et 2,5 W/g), seules les phases de mise en température et de ralentissement sont observées. Ceci peut, peut-être, s'expliquer par le fait qu'à ces niveaux de puissance spécifique, les flux d'eau de l'intérieur vers la surface de la tomate sont plus rapides que précédemment, aboutissant à une phase à vitesse constante plus courte. L'influence de la

puissance sur les cinétiques et vitesses de séchage peut s'expliquer par le fait que le transfert d'humidité au sein de l'échantillon de tomate est plus rapide lorsque la puissance de chauffage microondes est plus élevée. En effet, plus de chaleur est générée au sein de l'échantillon créant ainsi une différence de pression de vapeur d'eau plus grande entre le centre et la surface du produit. C'est ce fort gradient de pression qui serait à la base de l'élimination rapide de l'eau pour les puissances élevées (**Al-Harahsheh, Al-Muhtaseb, & Magee,** 2009). C'est même ce qui expliquerait qu'aux puissances élevées, on n'observe pas les phases constantes ; les conditions isenthalpiques ne seraient pas atteintes lorsque la température d'ébullition de l'eau est atteinte. Et cela demeure ainsi jusqu'à ce que la teneur en eau à la surface du produit diminue et devienne un facteur limitant du séchage, conduisant à son ralentissement (Abbasi & Mowla, 2008).

### III.1.1.2- EVOLUTION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE AU COURS DU SECHAGE

Nous nous intéressons ici au devenir de la puissance spécifique lorsque la puissance appliquée reste inchangée tout au long du processus de séchage (la figure 3.3).

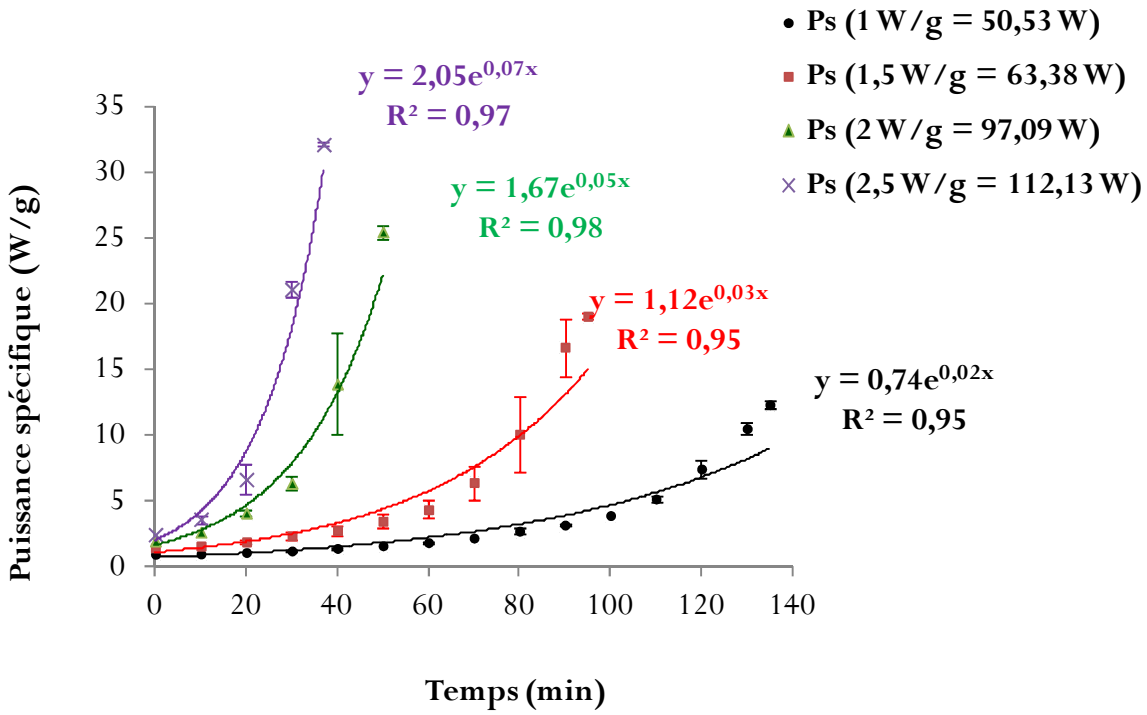



**Figure 3.3-** *Evolution de la puissance spécifique en fonction du temps de séchage à différentes conditions.*

La figure 3.3 indique bien qu'il y a variation de la puissance spécifique au cours du séchage pour les quatre niveau de puissances. Si l'on définit le facteur multiplicatif de la puissance microondes

(α) comme étant égal au rapport entre la puissance spécifique finale ($P_{sf}$) et la puissance spécifique initiale ($P_{si}$), on obtient le tableau 3.1 qui montre que ce facteur multiplicatif de la puissance en fin de séchage est en moyenne de 12,67 ± 0,21. C'est-à-dire qu'en fin de séchage la puissance spécifique, lorsqu'elle n'est pas régulée, est multipliée par 12,67 en moyenne par rapport à sa valeur initiale.

**Tableau 3.1-** *Facteur multiplicatif de la puissance spécifique (α) en fin de séchage MOAC*

| Facteur multiplicatif de la puissance | | |
|---|---|---|
| $P_{si}$ | $P_{sf}$ | α |
| 1,00 | 12,37 | 12,37 |
| 1,50 | 19,09 | 12,72 |
| 2,00 | 25,49 | 12,74 |
| 2,50 | 32,13 | 12,85 |
| Moyenne | | 12,67 |
| Ecart-type | | 0,21 |

C'est cette augmentation de la puissance spécifique en fin de séchage qui serait à l'origine de l'emballement thermique et donc de l'apparition des points chauds (figure 3.4) en fin de séchage bien que le plateau supportant l'échantillon soit en rotation et que le niveau faible de la température de l'air devrait avoir plutôt une action de refroidissement.




**Figure 3.4-***Tomates séchées par microondes combinées à l'air chaud (40°C) sans régulation de la puissance spécifique. a : 1 W/g ; b : 2W/g et c : 2,5 W/g.*

Nous allons par la suite analyser les qualités physique et chimique du produit afin de mettre en évidence l'impact d'un séchage microondes/air chaud à puissance fixe sur celles-ci.

## III.1.2- EVALUATION DE LA QUALITE DE LA TOMATE SECHEE SANS REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE

### III.1.2.1- COULEUR

L'impact de la puissance microondes sur l'évolution de la couleur au cours du temps a été évalué. La figure 3.5 illustre l'évolution des paramètres de couleur pour différentes conditions de séchage microondes/air chaud à une température d'air de 40°C.

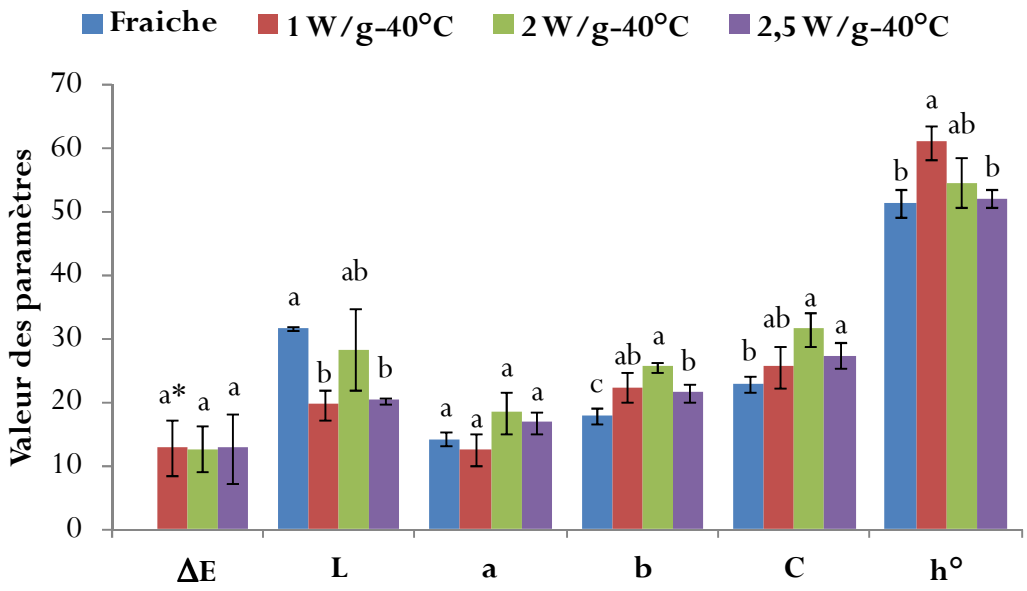



**Figure 3.5-** *Influence de la puissance spécifique combinée à l'air chaud (40°C) sur la couleur des tomates séchées. Evolution des paramètres de couleur pour différentes conditions de séchage MOAC (40°C).*

*Les barres représentent les moyennes des données des essais avec leur écart-types.*

**Pour chaque paramètre de couleur donné, lorsque les lettres au dessus des barres sont identiques, alors leurs valeurs sont significativement identiques (P>0,05) sinon, elles sont significativement différentes (P < 0,05).*

Le graphique de la figure 3.5 montre qu'il y a eu changement de couleur pour les trois niveaux de puissance (1, 2 et 2,5 W/g) à travers ΔE (différence de couleur totale) > 0. Par ailleurs, les valeurs de ΔE sont significativement non différentes (P > 0,05) pour les trois puissances spécifiques utilisées. On peut donc globalement dire que la puissance microondes n'influence pas considérablement le changement de couleur des tomates.

Cependant l'analyse individuelle des paramètres de la couleur révèle que :

- pour la valeur de la luminance $L^*$, plus la puissance est élevée plus elle est préservée car sa valeur est significativement non différente (P > 0,05) de celle de la tomate fraîche (figure 3.4). Cela est dû au fait qu'à puissance élevée (2 W/g) le temps de séchage est

plus court (50 minutes contre 135 minutes à 1 W/g) d'où une variation plus faible de $L^*$. (**Krokida & Maroulis**, 1999) ont aussi constaté que le séchage microondes à puissance moyenne et élevée préservait le produit séché des dégradations. Par contre l'on constate une baisse de cette luminance lorsque la puissance passe à 2,5 W/g. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la densité de puissance devient considérablement élevée en fin de séchage (32,3 W/g) car non régulée, entraînant ainsi un assombrissement du produit, bien que le temps de traitement soit plus faible qu'à 2 W/g.

- Au travers du paramètre a*, on note que les différents traitements n'ont aucune influence sur la composante rouge de la couleur de la tomate. Car les valeurs ont été jugées significativement non différentes ($P > 0,05$). Cela peut s'expliquer par le fait que le lycopène responsable en partie de cette couleur rouge, comme on le verra plus loin, a été dégradé au même taux pour les trois conditions de traitement (1, 2 et 2,5 W/g), donnant ainsi un taux résiduel de lycopène presqu'identique.
- Quant au paramètre b*, on note une augmentation de sa valeur qui est significativement différente de celle de la tomate fraîche ($P < 0,05$). En effet les données montrent que les tomates fraiches étaient plus jaunes que rouges ($b_0^* > a_0^*$). On peu donc dire qu'elles étaient orangées au départ. C'est ce qui pourrait expliquer ce renforcement de la couleur orangée en fin de séchage surtout que la saturation C* de la tomate séchée augmente aussi, significativement, avec la puissance microondes appliquée.
- Pour l'angle de teinte h°* on observe qu'il augmente pour 1 et 2 W/g, cependant il n'évolue pas pour 2,5 W/g par rapport à la tomate fraîche. Dans le premier cas l'angle de teinte s'approche du jaune (61° - 67,5°) et dans le second cas l'angle de teinte reste orangé (51°-56°).

### III.1.2.2- TAUX RESIDUEL EN LYCOPENE

Nous examinons ici l'influence du traitement microondes assistés par air chaud (MOAC) (à 40°C) sur la teneur résiduelle en lycopène de la tomate séchée. La figure 3.6 illustre les différents taux résiduels en lycopène en fonction des différents traitements.

A l'analyse de la figure 3.6, l'on constate que plus de la moitié (58,43; 59,57 et 54,47 %) du lycopène de la tomate est dégradé par le traitement thermique MOAC (1, 2 et 2,5 W/g) sans régulation de la puissance spécifique. De nombreux travaux font état de la dégradation du lycopène de produits à base de tomate au cours du chauffage et du séchage. Ainsi, (**Bauernfeind *et al.,*** (1981) et **MacDougall**, (2002) ont observé une perte d'environ 1–2% de lycopène lors du chauffage de jus de tomate à 100°C pendant 7 min. (**Noble**, 1975) a constaté que la concentration de pulpe de tomate à la chaleur entraînait jusqu'à 57% de perte en

lycopène. (**Giovanelli *et al.***, 2002) ont trouvé un taux résiduel en lycopène de 90% pour un séchage de la tomate à l'air chaud à 80°C ou à 110°C. Quant aux recherches de (**Goula** & **Adamopoulos**, 2005), elles indiquent que le séchage par atomisation de la pulpe de tomate donne un taux de perte en lycopène qui varie entre 8,07 et 20,93%. Soit un taux résiduel en lycopène variant de 79,07 à 91,93%.

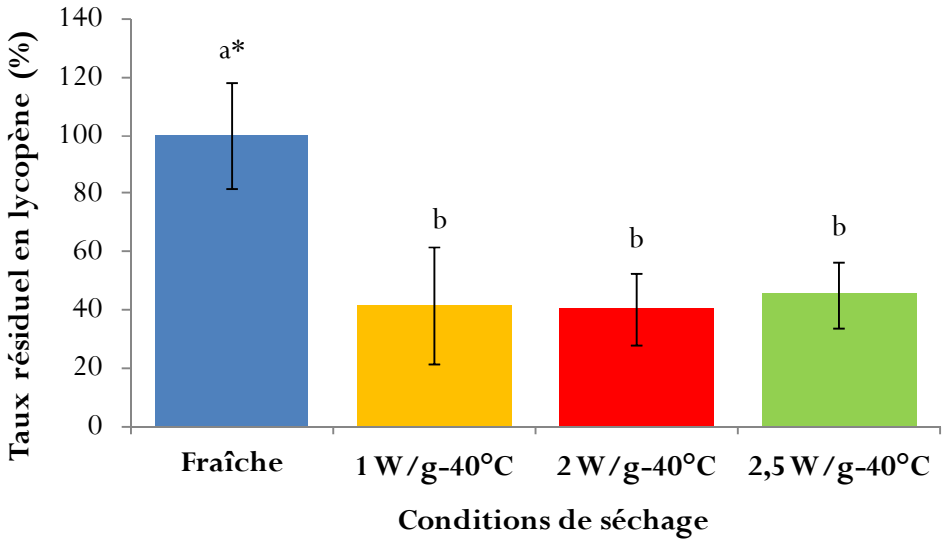



**Figure 3.6-** *Effet du traitement microondes combiné à l'air chaud (40°C) sur la teneur résiduelle en lycopène.*

*Les barres représentent les moyennes des données des essais avec leur écart-types. *Pour un paramètre de couleur donné, lorsque les lettres au dessus des barres sont identiques, alors leurs valeurs sont significativement identiques (P>0,05) sinon, elles sont significativement différentes (P < 0,05).*

### III.1.3- CONCLUSION PARTIELLE

Les résultats obtenus pour cette première stratégie de séchage de la tomate par MOAC (40°C) à puissance appliquée constante confirment les observations de la littérature, à savoir, une dégradation des qualités organoleptique (couleur) et nutritionnelle (lycopène) du produit pour des puissances spécifiques initiales trop élevées (2,5W/g dans notre cas). Nous obtenons en effet des échantillons de tomates séchées présentant des points chauds localisés et ayant perdu plus de la moitié de leur teneur en lycopène. Un produit correct (exempt de points noirs) peut être obtenu à faible puissance spécifique initiale (1W/g) mais ceci au détriment du temps de séchage qui passe de 38 minutes (à 2,5W/g) à 138 min (à 1W/g). On perd ainsi le principal intérêt d'un séchage microondes qui est sa rapidité, comparé à un séchage conventionnel.

Au vu de ces résultats, il apparaît indispensable de doser l'apport d'énergie microondes au produit tout au long du séchage, ceci afin de minimiser les surchauffes localisées et l'apparition de points noirs, à cause d'une densité de puissance trop élevée. Aussi avons-nous opté, vu que la

puissance microondes absorbée par le produit est fortement liée à sa teneur en eau **(Li, Raghavan, & Orsat**, 2010a), pour une "régulation à la proportionnelle " de la masse réelle du produit séchant. Autrement dit, cette régulation utilise la puissance spécifique microondes comme consigne, l'objectif étant d'améliorer la qualité du produit final mais avec une durée de séchage significativement réduite par rapport à un séchage classique. Notons au demeurant que **Li, Raghavan, & Orsat**, (2010a) ont également cherché à améliorer la qualité de la pomme séchée par microondes/air chaud en faisant appel à la régulation de la température du produit au cours du séchage.

## III.2- SECHAGE MICROONDE/AIR CHAUD AVEC REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE

Dans ce chapitre, seuls les résultats du mode 1 de la stratégie 2, à savoir, l'adaptation à chaque seconde de la puissance microondes appliquée en vue de maintenir la puissance spécifique constante, sont analysés. Les points suivants sont plus particulièrement abordés :

- caractérisation des courbes de séchage,
- évaluation des indicateurs de qualité,

Par ailleurs, une comparaison entre quelques caractéristiques physico-chimiques (couleur, texture) des tomates séchées à l'aide de ce mode 1 et celles de deux produits commerciaux (tomate italienne et ivoirienne séchées au soleil) est présentée.

Enfin, le mode 2 du séchage avec adaptation de la puissance appliquée toutes les 5 minutes, est comparé au mode 1, en termes de qualité des produits séchés et de consommation énergétique. Toutefois, les courbes des cinétiques et des vitesses de séchage en régulation par intermittence (mode 2) sont présentés en annexe V.

### III.2.1– CARACTERISATION DU SECHAGE MICROONDES/ AIR CHAUD AVEC REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE

Le comportement de la demi-tomate au séchage microondes assisté par air chaud (MOAC) a été étudié en utilisant 3 niveaux de puissance microondes (3, 5 et 7 W/g) combinés à différentes températures d'air chaud convectif (30, 40 et 50°C) à une vitesse de l'air constante de 1,5 m/s. Nous présentons uniquement les résultats pour les puissances spécifiques de 3, 5 et 7 W/g associées à une température d'air de 40°C. Les résultats obtenus pour ces puissances spécifiques associées aux températures d'air de 30 et 50°C suivent les mêmes tendances, ceux-ci sont présentés en annexe IV.

### III.2.1.1- REGULATION DE LA PUISSANCE SPECIFIQUE

#### III.2.1.1.1- Mode 1 : Séchage avec adaptation de la puissance appliquée à la masse du produit en continu (à chaque seconde) – régulation en continu de la puissance spécifique

La régulation de la puissance spécifique en continu au cours du séchage microondes a été réalisée comme décrit en II.2.1.2.1 de la partie II : Matériels et méthodes. La figure 3.7 montre l'évolution de la puissance spécifique moyenne sur 3 essais en fonction du temps de séchage pour différentes conditions de traitement.

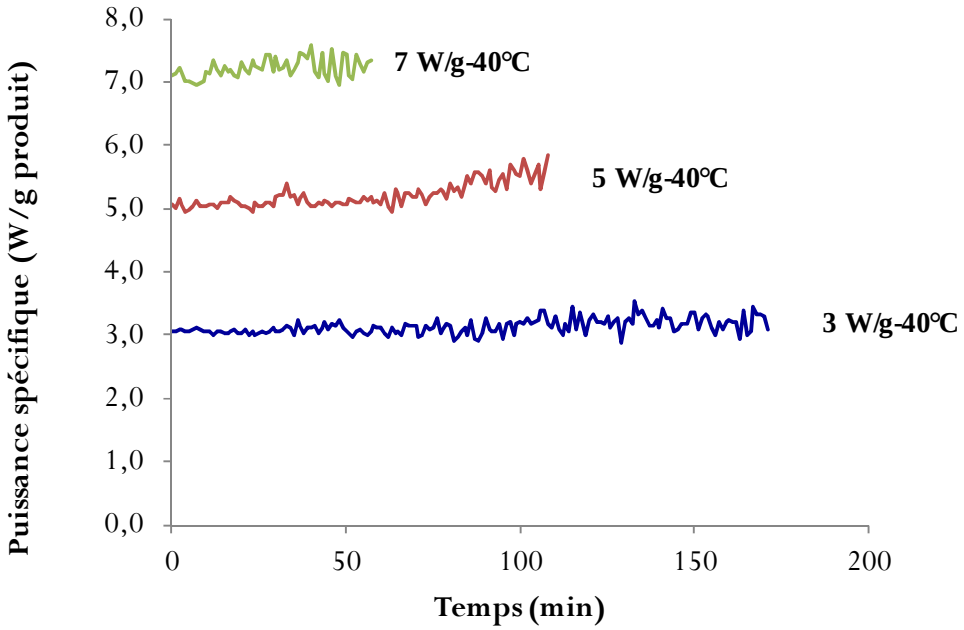



**Figure 3.7-** *Puissance spécifique régulée en continu (cycle d'1 s) à la "proportionnelle de la masse" de la tomate séchée à différentes conditions : 3, 5, et 7 W/g à 40°C.*

Nous constatons d'après cette figure que la régulation a été possible pour les différents niveaux de puissance microondes associés à la température de l'air à 40°C. En effet, les puissances spécifiques mesurées sont bien en moyenne de 3, 5 et 7W/g avec un écart-type de variant de 0,07 à 0,12 à 3 W/g, 0,18- 0,20 à 5 W/g et 0,13- 0,16 à 7 W/g (tableau 3.2). Par ailleurs, la régulation semble être plus fine en début de séchage quelque soient la consigne de puissance spécifique et de température d'air imposée et au contraire, de nombreuses fluctuations apparaissent en fin de séchage. Celles-ci sont d'autant plus importantes que la puissance spécifique imposée est élevée.

**Tableau 3.2**- *Ecart-types et coefficients de variation de la puissance spécifique au cours de séchage MOAC pour le mode 1 de la stratégie 2*

| Puissance spécifique MO* (W/g) | Température (°C) | Ecart-type (W/g) | Coefficient de variation (%) |
|---|---|---|---|
| 3 W/g | 30 | ± 0,07 | 2,3 |
| | 40 | ± 0,12 | 4,0 |
| | 50 | ± 0,12 | 4,0 |
| 5 W/g | 30 | ± 0,18 | 3,6 |
| | 40 | ± 0,20 | 4,0 |
| | 50 | ± 0,20 | 4,0 |
| 7 W/g | 30 | ± 0,13 | 1,9 |
| | 40 | ± 0,16 | 2,3 |
| | 50 | ± 0,14 | 2,0 |

*MO : microondes

Ce phénomène peut s'expliquer par le fait qu'en fin de séchage la masse du produit est de plus en plus faible entraînant une plus grande fluctuation de la valeur mesurée de la masse, comme le montre les graphes de la figure 3.8, pour un exemple de séchage MOAC (40°C), représentant l'évolution de la masse du produit en fonction du temps. De même, l'air de séchage n'étant pas dévié lors de la pesée on peut supposer qu'il aura une certaine influence au cours du séchage, même si le tarage initial du système se fait en présence de l'air, puisque la perte de charge va légèrement évoluer dans le temps.

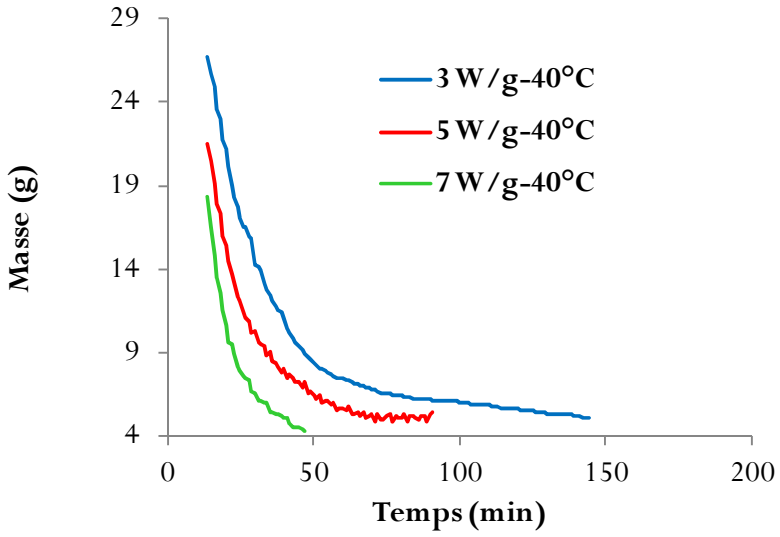



**Figure 3.8-** *Fluctuation de la mesure de la masse de l'échantillon en fin de séchage à différentes conditions : 3W/g-40°C , 5W/g-40°C et 7 W/g-40°C.*

### III.2.1.1.2- Mode 2 : séchage avec adaptation de la puissance appliquée à la masse du produit par intermittence (toutes les 300 secondes) – régulation de la puissance spécifique par intermittence

La régulation de la puissance spécifique microondes au cours du séchage a aussi été réalisée par intermittence (toutes les 300 secondes). La figure 3.9 illustre l'évolution de la puissance spécifique moyenne réelle (de trois essais) appliquée au produit en fonction du temps.

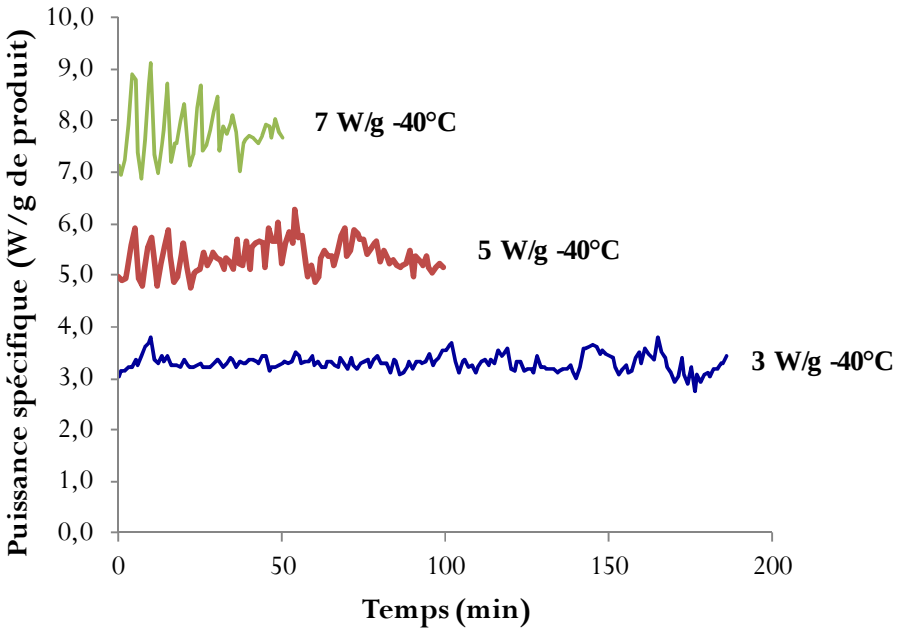



**Figure 3.9-** *Puissance spécifique régulée par intermittence (cycle de 300 s) à la "proportionnelle de la masse" de la tomate séchée dans différentes conditions : 3, 5, 7 W/g à 40°C.*

Comme précédemment, cette figure montre également que la régulation de la puissance spécifique ($P_s$) par intermittence de 300 s est possible, pour des consignes en puissances spécifiques de 3, 5, 7 W/g à température d'air de 40°C. Ici les fluctuations observées sont relativement plus grandes que celles observées pour le mode 1 (tableau 3.2) ce qui est normale puisqu'aucune action de commande n'est faite durant les 300 secondes qui précèdent une adaptation de la puissance à la masse. On observe ainsi un coefficient de variation minimum de 16 % sur la puissance spécifique (tableau 3.3) à comparer avec les 4%, au maximum, obtenu pour le mode 1. Contrairement au cas précédent (mode 1), les fluctuations sont plus importantes en début qu'en fin de séchage. C'est un résultat tout à fait cohérent puisque la perte de masse est rapide en début de séchage, alors qu'en fin de séchage, les pertes de masses sont de plus en faibles pour ce même laps de temps, ce qui se traduit par des fluctuations moins importantes de la puissance spécifique même si on tient compte des erreurs de pesée.

**Tableau 3.3-** *Ecart-types et coefficients de variation de la puissance spécifique au cours du séchage MOAC pour le mode 2 de la stratégie 2*

| Puissance spécifique MO* (W/g) | Température (°C) | Ecart-type. (W/g) | Coefficient de variation (%) |
|---|---|---|---|
| 3 W/g | 30 | ± 0,63 | 21,0 |
| | 40 | ± 0,79 | 26,3 |
| | 50 | ± 0,84 | 28,0 |
| 5 W/g | 30 | ± 0,81 | 16,2 |
| | 40 | ± 1,27 | 25,4 |
| | 50 | ± 1,46 | 29,2 |
| 7 W/g | 30 | ± 1,76 | 25,1 |
| | 40 | ± 2,12 | 30,3 |
| | 50 | ± 1,90 | 27,1 |

*MO : Microondes

Toutefois, on peut penser que ces fluctuations importantes en début de séchage auront un impact réduit sur la qualité du produit puisque la tomate est encore suffisamment riche en eau dans cette phase. Néanmoins, ces fluctuations peuvent dans certaines conditions aboutir à la déstructuration du produit par son éclatement, suite à une pression interne trop importante. Nous avons en effet régulièrement observé ce phénomène dans le cas du séchage à 7 W/g, où la tomate se vide de son contenu après éclatement. Par contre, ces fluctuations de puissances même si elles s'amenuisent en fin de séchage restent importantes pour certaines conditions. Et en fin de séchage, la montée en puissance spécifique pourrait engendrer l'apparition de points chauds au niveau du produit.

En conclusion, une action en continu ou par intermittence sur la puissance appliquée permet de réguler la puissance spécifique avec une incidence que l'on peut espérer positive sur le phénomène d'emballement thermique qui survient dans le cas d'un séchage MOAC à puissance appliquée fixe. Néanmoins, le problème de fluctuation de la puissance spécifique en fin de séchage pour les 2 modes de régulation gagnerait à être maitrisé par une meilleure stabilisation de la mesure de la masse réalisée par pesée *in situ*. Une amélioration du pilote microondes en ce sens pourrait être la déviation de l'air lors de la pesée afin d'éliminer l'influence de celui-ci sur la pesée.

### III.2.1.2-CARACTERISATION DES COURBES DE SECHAGE EN REGULATION CONTINUE

Les profils des courbes de séchage ont été comparés d'abord pour différentes puissances microondes avec une température fixe, puis pour différentes températures avec un niveau de puissance microondes spécifique fixe.

#### III.2.1.2.1- Influence de la puissance microondes sur les cinétiques et vitesses de séchage

L'étude de l'impact de la puissance spécifique sur l'évolution de la teneur en eau de la demi-tomate a été réalisée. Les courbes de la figure 3.10 illustrent l'évolution des teneurs en eau du produit en fonction du temps pour différentes conditions de séchage.

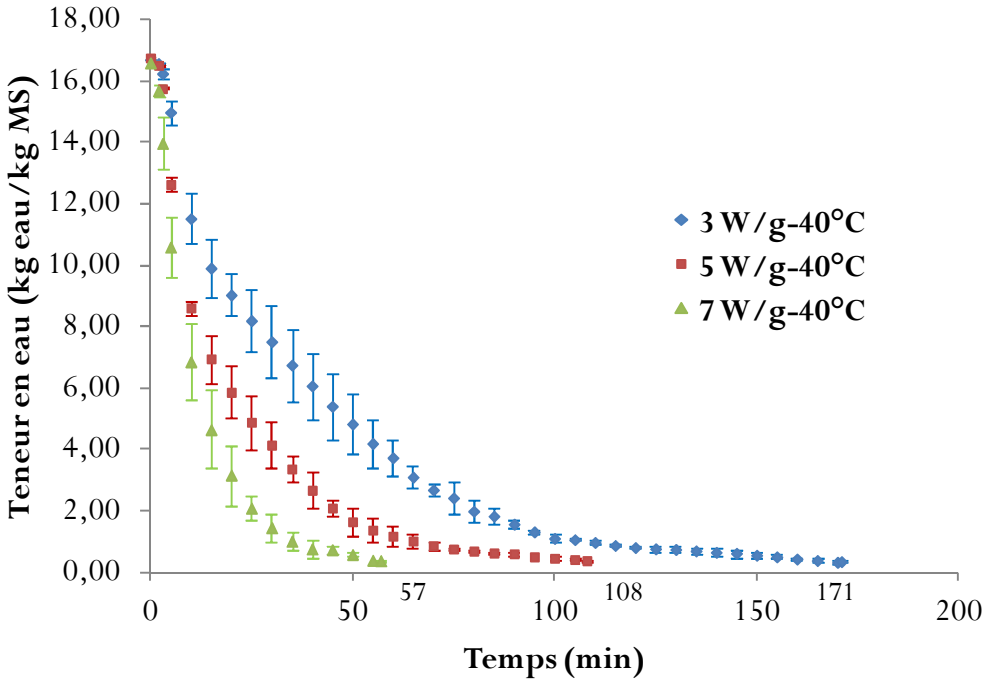



**Figure 3.10-** *Impact de la puissance sur la cinétique de séchage. Evolution de la teneur en eau de la tomate à différentes conditions de séchage MOAC (3 W/g-40°C, 5 W/g-40°C et 7 W/g-40°C) avec régulation de la puissance spécifique en continu chaque seconde.*

A l'analyse des courbes de cette figure, pour lesquelles le taux d'humidité final est de 22% ±5%, la teneur en eau décroit avec le temps de séchage et la puissance microondes appliquée. Ainsi, comme prévisible la durée de séchage est d'autant plus faible que la puissance spécifique est élevée. L'étude de l'influence de la puissance microondes sur la vitesse de séchage nous en dira davantage.

Les courbes d'évolution de la vitesse de séchage en fonction de la teneur en eau, établies à partir des cinétiques de séchage, sont présentées dans la figure 3.11.

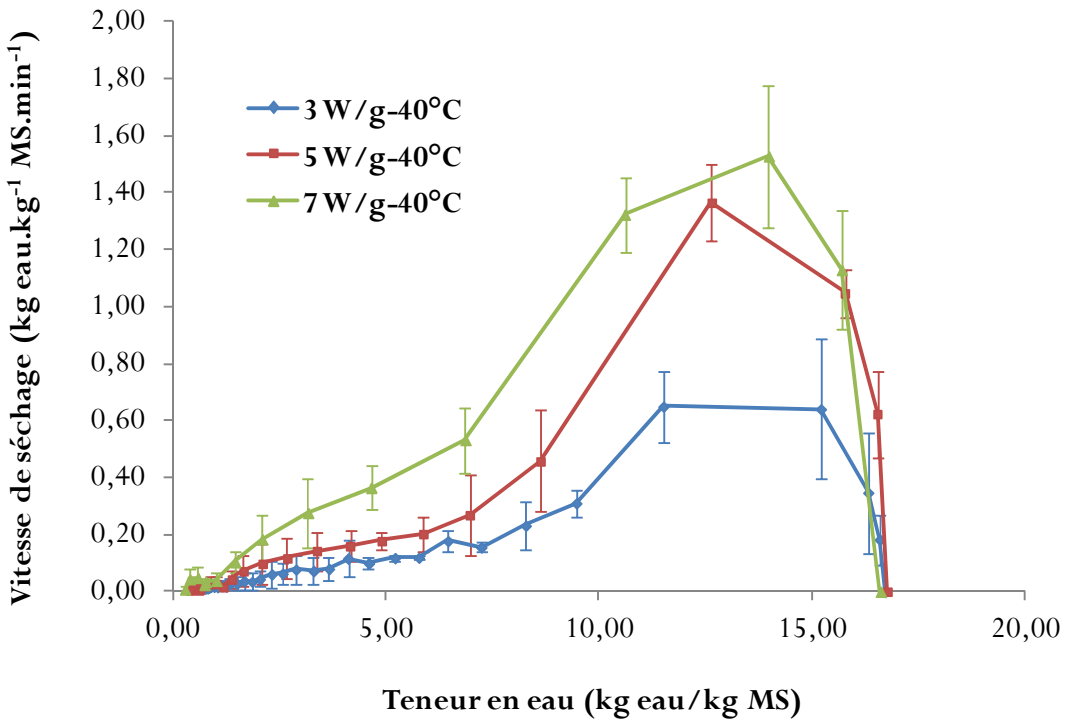



**Figure 3.11-** *Effet de la puissance spécifique sur la vitesse de séchage à différentes conditions de séchage MOAC (40°C) en régulation continue de la puissance spécifique.*

Ces courbes viennent confirmer l'influence du niveau de puissance microondes sur le comportement au séchage de la tomate. En effet, on note que la vitesse de séchage augmente avec la puissance spécifique. On peut noter par ailleurs que cette influence de la puissance spécifique est effective pendant la quasi-totalité du séchage, et ceci quelque soit la température d'air considérée (voir les autres figures en annexe IV).

Globalement on ne distingue que deux phases : une phase de mise en température et une phase de ralentissement de la vitesse de séchage. Cela a été déjà observé au cours de la mise en œuvre de la stratégie 1. Cependant, la deuxième phase de migration de l'eau peut être scindée en deux étapes comme l'on déjà rapporté **McMinn**, (2006) pour le séchage MOAC de poudre pharmaceutique et **Maskan**, (2001) pour le séchage de kiwi. En effet, selon **Nadeau & Puiggali** (1995)**,** pour les matériaux riches en eau (cas de la tomate avec environ 94% d'humidité), pendant la phase de ralentissement, il existe deux périodes. Une première à ralentissement rapide qui commence au point critique 1, où la zone d'évaporation "front de séchage" se déplace de la surface du matériau vers l'intérieur. La brusque réduction de la surface effective de transfert due à une alimentation insuffisante en eau libre est la cause de ce

ralentissement. Et une seconde période ou « période à allure finale » pour laquelle le ralentissement est plus lent, et qui débute au point critique 2 (unique pour les matériaux riches en eau).

Ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que pour les puissances microondes élevées, plus d'énergie est générée au sein du produit. Cela engendre un gradient de température et de pression de vapeur d'eau (entre le centre et la surface du produit) plus important pour les fortes puissances par rapport aux faibles puissances (**Lin, Durance, & Scaman**, 1998) ; (**Wang *et al.*,** 2007). Ce sont ces gradients de température et de pression plus importants qui sont la cause d'une diffusion plus rapide de la vapeur d'eau aux puissances microondes élevées.

### III.2.1.2.2- Influence de la température de l'air sur les cinétiques et vitesses de séchage

La figure 3.12 représente les cinétiques du séchage MOAC pour une puissance spécifique de 5 W/g. Les résultats pour les puissances de 3 et 7 W/g sont présentés en annexe IV, car globalement identiques à ceux de 5 W/g.

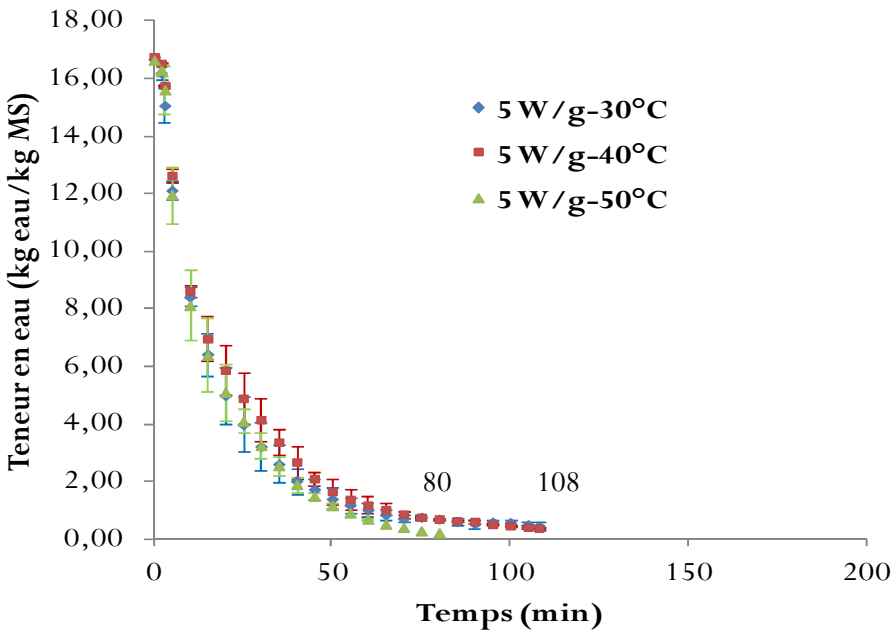



**Figure 3.12-** *Evolution de la teneur en eau de la tomate à différentes conditions de séchage (5 W/g-30°C, 5 W/g-40°C et 5 W/g-50°C) avec régulation de la puissance spécifique en continu chaque seconde.*

Les courbes (figure 3.12) révèlent que globalement il n'y a pas d'influence significative de la température de l'air de séchage tout le long du procédé. Toutefois en fin de séchage, à la température de 50°C, la durée du séchage est plus rapide (80 minutes à 5W/g-50°C contre 108 minutes à 5W/g-30 et 40°C). Cela est confirmé par la figure 3.13, représentant les courbes de

vitesses de séchage en fonction de la teneur en eau. Ces courbes sont presque confondues de la période de mise en température (période 0) et à la période de ralentissement (période 2). En effet, la puissance spécifique appliquée étant identique, et générant une température au sein du produit largement supérieure à la température de l'air, on observe la non influence de la température de l'air. Et l'absorption des microondes par le produit est quasi identique.

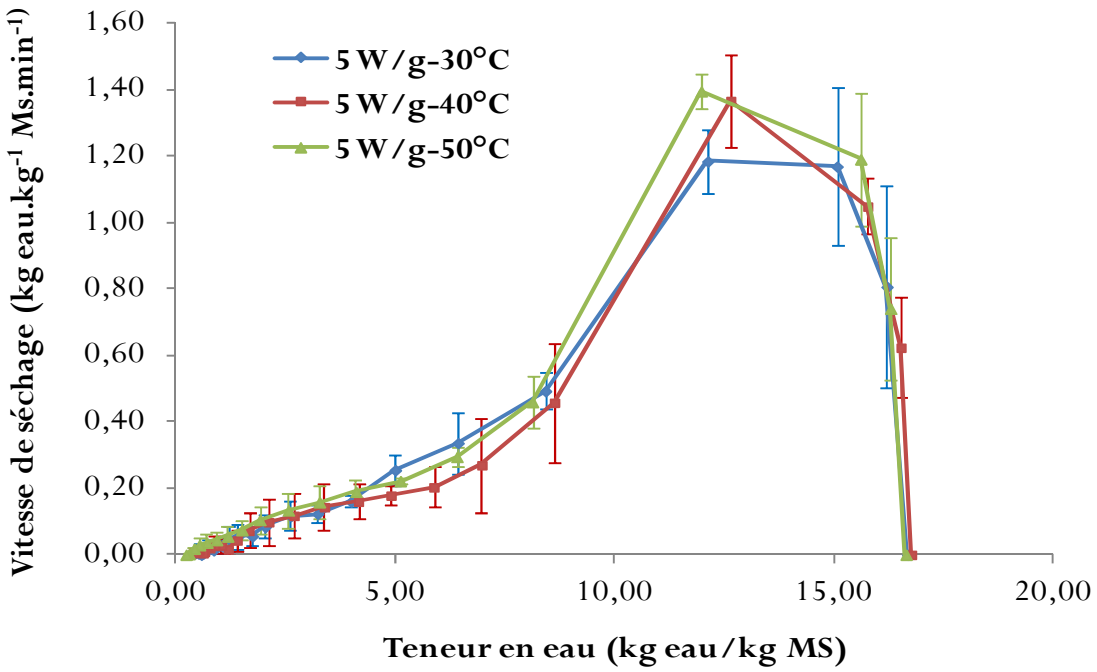



**Figure 3.13-** *Effet de la température de l'air sur vitesse du séchage de la tomate à différentes conditions microondes /air chaud en régulation continue de la puissance spécifique (5W/g).*

En résumé, il apparaît que pour augmenter la vitesse et réduire le temps de séchage il est préférable d'agir sur la puissance microondes et non sur la température de l'air. Ce constat est, somme toute, assez logique puisqu'à l'inverse d'un séchage classique l'air n'est pas utilisé pour apporter de l'énergie au produit mais seulement pour évacuer l'eau provenant de celui-ci (de fait, c'est le produit qui cède de l'énergie à l'air). Ainsi, pour des raisons d'économie d'énergie il serait même préférable d'utiliser de l'air froid. On est toutefois limité par le fait qu'un air froid possède un degré de siccité insuffisant à une bonne absorption de l'humidité provenant du produit. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre un air pas trop chauffé pour économiser de l'énergie et un air assez chaud pour que son taux d'humidité permette un écart de pression de vapeur d'eau suffisant entre l'air et la surface du produit.

### III.2.1.2.3- Evolution de la température du produit au cours du séchage

Les courbes de la figure 3.14 représentent l'évolution de la température de la tomate séchée en fonction du temps de séchage à différentes puissances spécifiques microondes associées à la température de l'air de 40°C. Les courbes obtenues à 30 et 50°C ont des tendances identiques à de la figure 3.14 et présentés en annexe IV.

Contrairement à ce qu'obtiennent (**Li, Raghavan, & Orsat**, 2010a) au cours de leur séchage MOAC de la pomme, où ils pratiquent une adaptation ON/OFF de la puissance appliquée qui reste constante au cours du séchage, la température du produit diminue au cours du séchage .

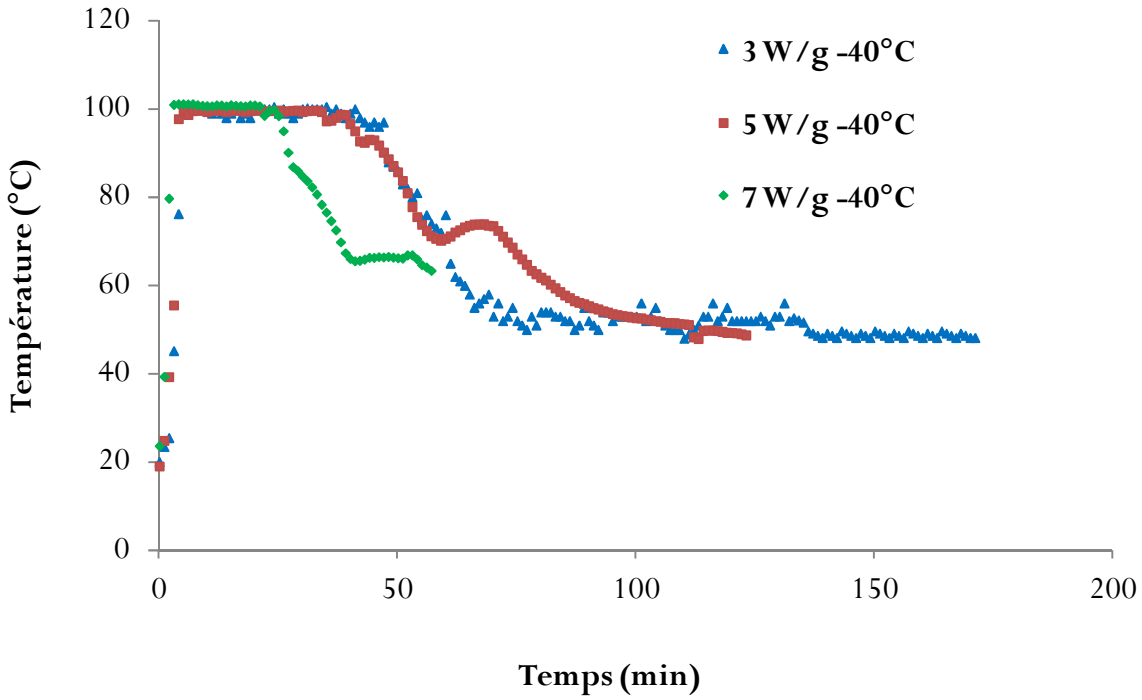



**Figure 3.14-** *Evolution de la température de la tomate au cours séchage MOAC avec régulation de la puissance spécifique en continu à différentes conditions: 3W/g-40°C, 5W/g-40°C et 7 W/g-40°C*

Cette diminution, liée dans notre cas à l'adaptation de la puissance spécifique à la masse réelle du produit, correspondrait indirectement à une régulation de la température du produit. En effet, avec la régulation de la puissance spécifique " à la proportionnelle " de la masse du produit, la puissance appliquée diminue avec la masse du produit. Cela engendre donc une diminution de la puissance absorbée par le produit en fonction de sa teneur en eau comme le montre les courbes de la figures 3.15. On observe aussi que plus la puissance est élevée plus vite on atteint la température d'ébullition de l'eau (100°C) à pression atmosphérique. Les températures passent rapidement de 20 ± 3°C à 100 ± 1°C entre 3, 5 et 6 minutes en moyenne

respectivement pour les niveaux de puissance de 7, 5 et 3 W/g : c'est la phase de mise en température du produit. Ensuite elles restent constantes sur une durée variable en fonction de la puissance appliquée, c'est la phase d'ébullition de l'eau où la pression de vapeur d'eau à la surface de la tomate est égale à la pression totale ambiante (**Bimbenet, Duquenoy & Trystram**, 2002). Enfin on observe globalement une décroissance progressive de la température. Cela est dû non seulement à la baisse de la puissance appliquée (due à la régulation) mais également au refroidissement du produit par l'air ventilé.

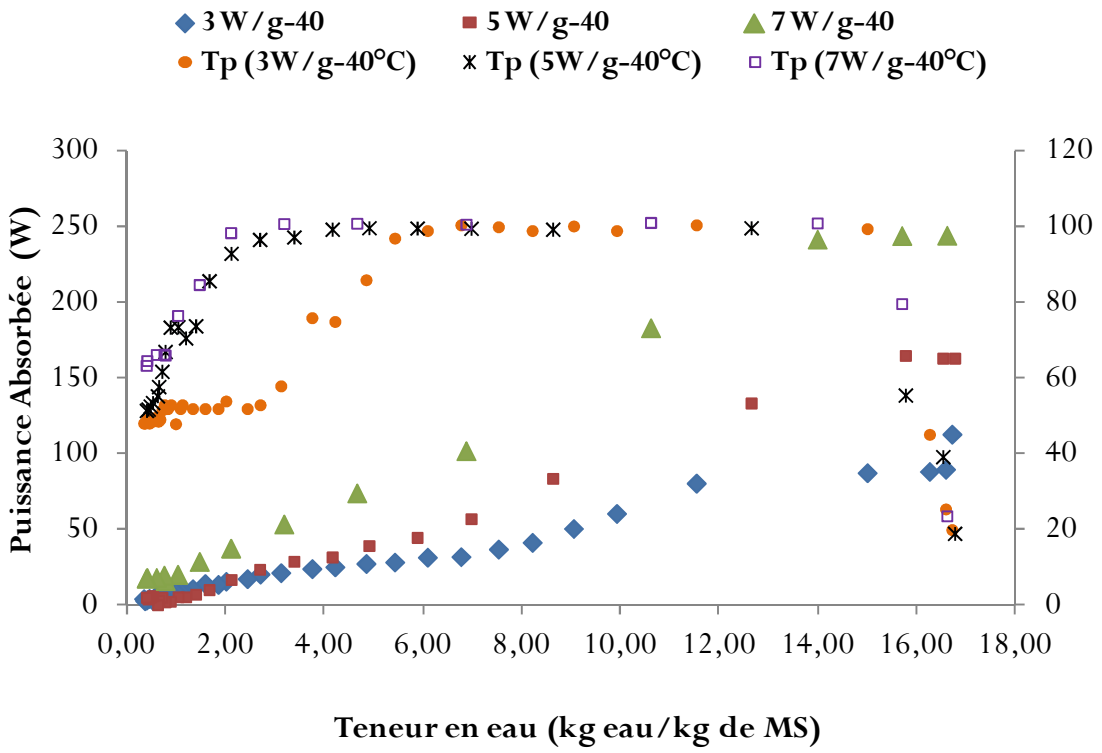



**Figure 3.15**- *Evolution de la puissance microondes absorbée et de la température du produit en fonction de la teneur en eau en pilotage continu (chaque seconde) de la puissance spécifique, avec fixation de température de l'air à 40°C.*

On peut aussi observer que la température en fin de séchage (figure 3.14 et 3.15) augmente avec la puissance microonde, ce qui est normal, et révèle que l'effet du refroidissement du produit est fonction de la puissance spécifique de départ. Donc pour refroidir plus le produit en fin de séchage et éviter les emballements thermiques, il faut modérer la puissance microonde de départ.

### III.2.1.2.4- Evolution de la vitesse de séchage en fonction de la puissance absorbée

La figure 3.16 illustre l'évolution de la vitesse de séchage de la demi-tomate en fonction de la puissance absorbée à différentes conditions de séchage (3, 5, 7 W/g-40°C). Les conditions de séchage MOAC à 30 et 50°C sont données en annexe IV. La puissance absorbée par la demi-tomate est fonction du niveau de puissance appliquée. Plus la puissance microondes appliquée est importante plus la tomate absorbe de l'énergie (**Li, Raghavan, & Orsat**, 2010b), ce qui est normal. Et plus le produit absorbe l'énergie, plus la vitesse d'élimination de l'eau du produit est élevée, comme on l'observe aux différentes courbes de la figure 3.16. La température de séchage n'a qu'un léger effet sur la vitesse de séchage. On a aux puissances de 3, 5 et 7 W/g des pics de vitesses qui varient de 0,739 – 1,268 - 1,620 kg d'eau.kg $Ms^{-1}.min^{-1}$ à 40°C et de 0,736 - 1,194 -1,264 kg d'eau/kg $Ms^{-1}.min^{-1}$ à 30°C , puis de 0, 874 – 1,495 et 1,626 kg d'eau.kg $Ms^{-1}.min^{-1}$ à 50°C.

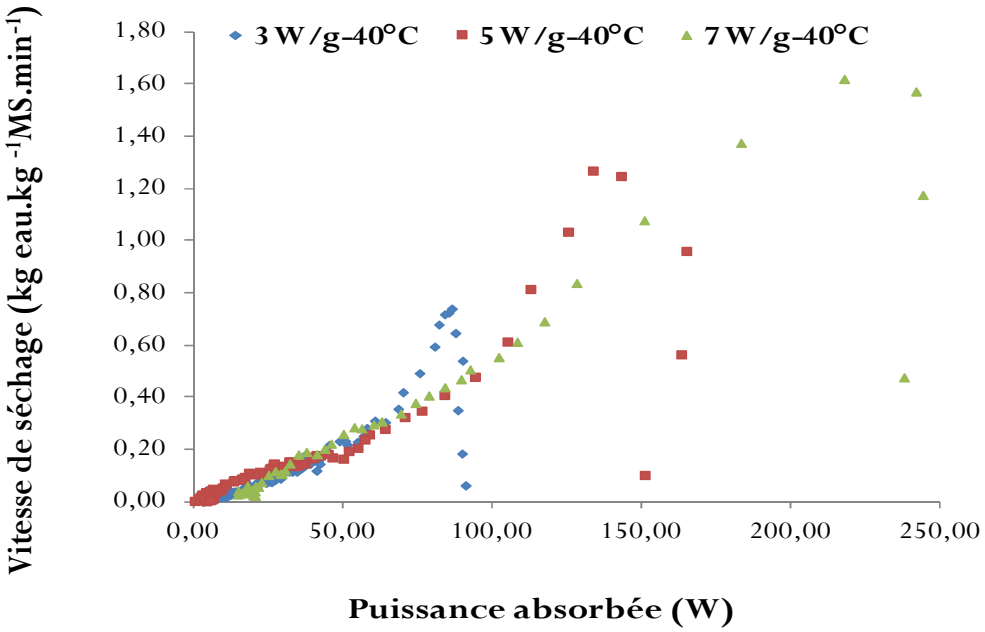



**Figure 3.16-** *Vitesse de séchage de la demi-tomate en fonction de la puissance absorbée au cours du séchage MOAC (40°C) à différentes conditions de séchage*

En fin de séchage, on note qu'à puissance absorbée identique, les vitesses de séchage sont comparables quelque soit la puissance spécifique appliquée. Cela signifie qu'en fin de séchage l'eau liée est extraite du produit à la même vitesse quelque soit la puissance appliquée. Ainsi comme pour un séchage par air chaud classique le facteur limitant du transfert d'eau en fin de séchage est la diffusion la migration de l'eau de l'intérieur vers la surface du produit. Pour avoir

des vitesses de séchage plus élevées il faut donc utiliser des puissances microondes plus élevées en début de séchage puis réduire cette puissance en fin de séchage pour préserver la qualité du produit. Ceci illustre l'intérêt d'une régulation à la proportionnelle de la masse.

### III.2.1.3- BILAN THERMIQUE EVAPORATOIRE

L'étude du bilan thermique évaporatoire a pour objectif de confirmer ou infirmer la baisse de la température du produit en fin de séchage. Les courbes de la figure 3.17 représentent l'évolution de ce bilan thermique évaporatoire (Eab-Evap) en fonction du temps de séchage. Les énergies absorbées par le produit (Eab) et d'évaporation de l'eau du produit (Evap) sont déterminées par les relations suivantes :

$$E_{ab} = \sum_{i=0}^{n} P_{ab,i}.(t_{i+1} - t_i) = \sum_{i=0}^{i=n} (P_{ap,i} - P_{ref,i} - P_{tr,i}).(t_{i+1} - t_i) \qquad (3.1)$$

$$E_{vap} = \sum_{i=0}^{n} (m_i - m_{i+1}).\Delta Hv \qquad (3.2)$$

Avec $P_{ab,i}$ la puissance absorbée (en W) au i$^{ème}$ instant, ti+1 et ti , les i+1$^{ème}$ et i$^{è}$ instants (en s),

$P_{ap,i}$ , la puissance appliquée (en W) au i$^{ème}$ instant,

$P_{ref,i}$, Puissance réfléchie (en W) au i$^{ème}$ instant,

$P_{tr,i}$, Puissance transmise (en W) au i$^{ème}$ instant, Mi, Mi+1 la masse du produit (en g) au i et i+1$^{ème}$ instant.

ΔHv, la chaleur latente de vaporisation de l'eau (= 2257 kJ/kg à 100°C).

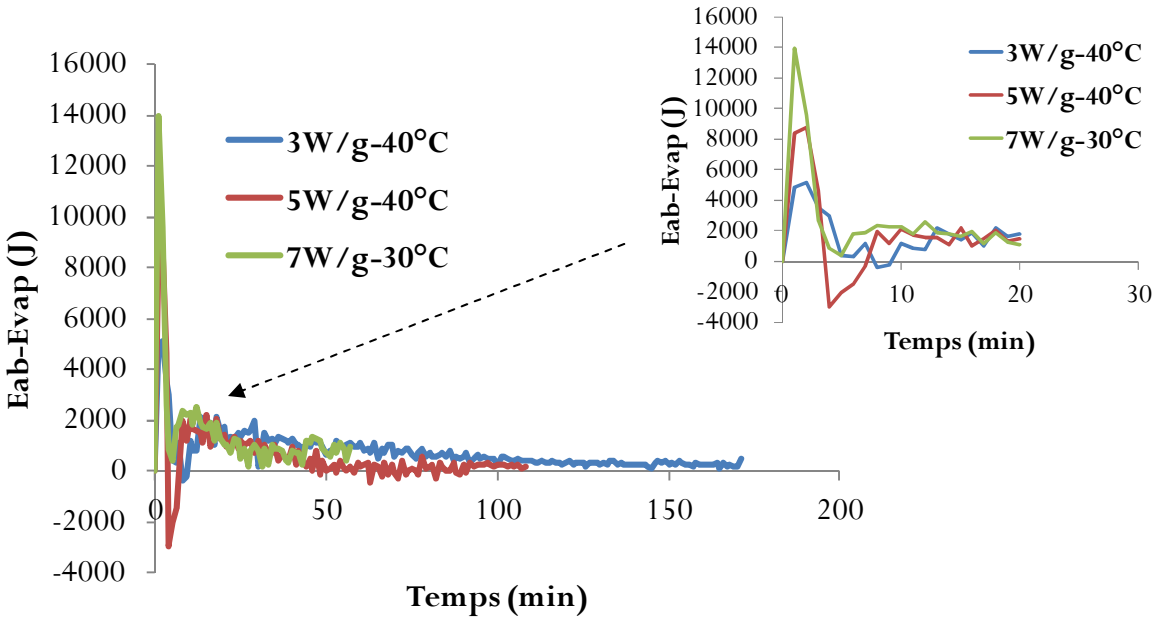



**Figure 3.17-** *Bilan thermique évaporatoire en séchage MOAC avec régulation de la puissance spécifique à différentes conditions (3W/g-40°C, 5W/g-40°C, 7W/g-40°C)*

A l'analyse des différentes courbes de la figure 3.17, il apparait que le bilan thermique évaporatoire augmente brutalement en début de séchage donc, que l'énergie sensible augmente brutalement en début de séchage, dû à la montée rapide de la température du produit (figure 3.14). Ensuite l'énergie évaporatoire (Evap) tend à augmenter avec la température du produit jusqu'à atteindre la valeur de l'énergie absorbée (Eab). On dit alors que toute l'énergie absorbée est utilisée pour évaporer l'eau par ébullition. La chaleur sensible s'annule et la température du produit reste constante (égale à 100°C). Puis l'énergie d'évaporation diminue avec la baisse d'eau évaporée due à la réduction du pourcentage de puissance appliquée (avec la régulation). Vers la 5ème minute de séchage, Eab continue de baisser mais Evap diminue encore plus vite que celle-ci, entrainant l'augmentation du bilan évaporatoire durant un court instant. Puis en fin de séchage ce bilan évaporatoire diminue à nouveau avec la baisse de Eab et Evap. D'où une baisse de l'énergie sensible qui, associée au transfert convectif entre l'air de balayage et la surface du produit, entraine une baisse de la température du produit comme observé sur la figure 3.14.
On observe également que la chaleur sensible est influencée par la puissance spécifique appliquée, car elle augmente avec cette dernière. Ce qui parait évident car plus on apporte d'énergie plus on en a suffisamment pour réaliser l'évaporation. Cela confirme bien les affirmations rapportées plus haut concernant la vitesse de séchage plus rapide pour les puissances plus élevées.

En résumé, au cours du séchage MOAC de la demi tomate, le pilotage de la puissance spécifique (stratégie 2) permet une régulation indirecte de la température du produit en fin de séchage grâce à la baisse de la puissance appliquée et au refroidissement par l'air de balayage. Ainsi les points chauds obtenus au cours de la stratégie 1 (séchage MOAC sans régulation de la puissance spécifique) peuvent être évités et donner des produits de bonne qualité visuelle.

#### III.2.1.4-EVALUATION DES INDICATEURS DE QUALITE EN REGULATION CONTINUE

### III.2.1.4.1- Couleur

La couleur fait partie des attributs importants d'un produit déshydraté, du point de vue du consommateur. Car il intervient dans le choix du produit par le consommateur au cours de l'achat ou de la consommation. L'objectif de ce chapitre est dans un premier temps d'examiner l'évolution de la qualité de la couleur de la tomate séchée par MOAC avec pilotage de la puissance spécifique comparativement à des tomates commerciales (d'origine italienne et ivoirienne) de référence. Dans un second temps, il est de voir l'effet de la puissance et de la température sur le produit traité. Nous présenterons uniquement le séchage MOAC (40°C).
Les résultats pour les tomates séchées à différentes puissances spécifiques microondes (3, 5, et 7W /g) liées aux températures d'air de 30 et 50°C ont les mêmes tendances que celles des figures 3.18, et sont présentés en annexe IV.

La clarté (luminance) : paramètre L*

La figure 3.18a présente l'évolution de la clarté (luminance) du broyat de tomate à l'état frais, séché par MOAC (40°C) en régulation continu de la puissance spécifique, et séché au soleil (tomates commerciales).

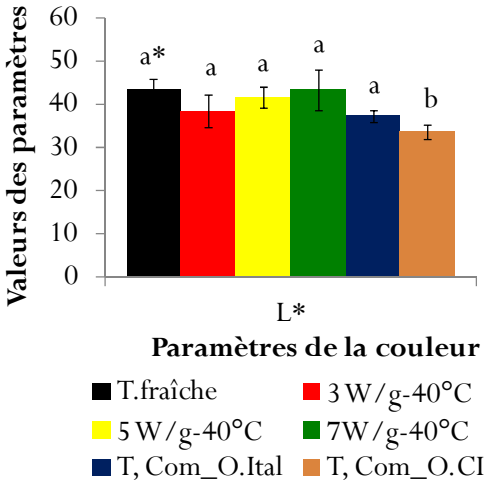



**Figure 3.18a-** *Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre L*(Luminance) des demi-tomates séchées par MOAC (40°C) pour différents niveaux de puissances spécifiques. Comparaison du paramètre L* de la tomate fraiche, séchée par MOAC et des tomates commerciales italienne et ivoirienne.*

** les barres du paramètre ayant les lettres différentes sont significativement différents (P<0,05). T.Com_OItal = Tomate commerciale : Origine Italie ; T.Com_CI = Tomate commerciale : Origine côte d'Ivoire. T. fraîche = Tomate fraîche.*

Globalement, les résultats indiquent que les valeurs de la luminance (L), des tomates traitées par MOAC sont statistiquement identiques (P > 0,05) à celle de la tomate fraîche, et que parmi les tomates commerciales seule la tomate italienne a une luminance comparable à celle de la tomate fraîche. En effet, la tomate commerciale ivoirienne possède une luminance qui est statistiquement inférieure (P <0,05) à celles des tomates traitées par MOAC et des tomates fraiches. Cela signifie que le séchage par MOAC permet de préserver la luminance de la tomate, comme l'ont aussi rapporté **Alibas**, (2007) et **Maskan**, (2001). Quant au séchage au soleil, il assombrit les tomates commerciales, dû au temps de séchage long (110 heures selon **Sacilik, Keskin, & Elicin,** (2006)). Ce long temps de séchage serait à l'origine de l'oxydation des tomates séchées au soleil qui dégraderait les pigments et conduirait au brunissement (**Chen *et al.,*** 2009).

- La teinte (couleur rouge) : paramètre +a*

La figure 3.18b présente l'évolution du paramètre a* (en valeur positive), relatif à la coloration rouge du broyat de tomate frais, séché par MOAC (40°C) en régulation continu de la puissance spécifique, et séché au soleil (tomates commerciales).

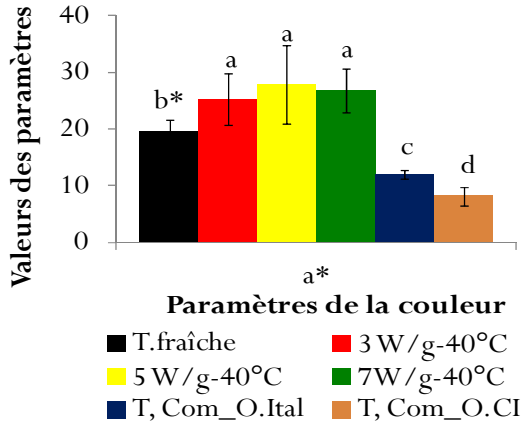



**Figure 3.18b-** *Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre a*(teinte rouge) des demi-tomates séchées par MOAC (40°C) pour différentes puissances spécifiques. Comparaison du paramètre a* de la tomate fraiche, séchée par MOAC et des tomates commerciales italienne et ivoirienne.*

** les barres du paramètre ayant les lettres différentes sont significativement différents (P<0,05). T.Com_OItal = Tomate commerciale : Origine Italie ; T.Com_CI = Tomate commerciale : Origine côte d'Ivoire. T. fraîche = Tomate fraîche.*

Au niveau de la teinte rouge (paramètre a* positif) de la tomate séchée par MOAC, quelles que soient les conditions de séchage, on note que sa valeur est significativement supérieure à celle de la tomate fraîche. Cela a été déjà rapporté par plusieurs auteurs (**Maskan**, 2001; **Heredia et *al.,*** 2009 **; Al-Muhtaseb *et al.,*** 2010). Il y a donc renforcement de la couleur rouge de la tomate qui confirme bien qu'il n'y a pas de brunissement non-enzymatique (**Feng & Tang**, 1998 ; **Funebo & Ohlsson**, 1998; **Maskan**, 2000). Ce renforcement de la couleur rouge peut être dû à celui de la saturation C* (l'intensité de la couleur). Aussi ces valeurs du paramètre a* sont significativement identiques ($P > 0,05$) pour les trois niveaux de puissance. Cela signifie que les différentes conditions de séchage MOAC n'influencent pas de façon significative la teinte rouge de la tomate.

- La teinte (couleur jaune) : paramètre +b*

La figure 3.18c représente l'évolution du paramètre b* relatif à la couleur jaune de la tomate fraiche et séchée par MOAC (40°C) avec pilotage de la puissance spécifique en continu, puis des tomates commerciales italienne et ivoirienne.

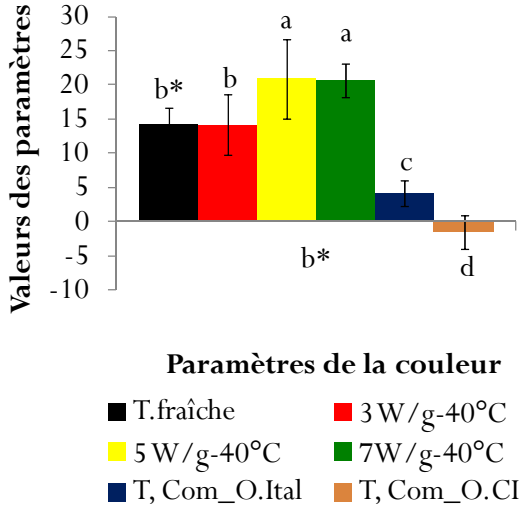



**Figure 3.18c-** *Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre b*(teinte jaune) des demi-tomates séchées par MOAC (40°C) pour différentes puissances spécifiques. Comparaison du paramètre b* de la tomate fraiche, séchée par MOAC et des tomates commerciales italienne et ivoirienne.*

** les barres du paramètre ayant les lettres différentes sont significativement différents (P<0,05). T.Com_OItal = Tomate commerciale : Origine Italie ; T.Com_CI = Tomate commerciale : Origine côte d'Ivoire. T. fraîche = Tomate fraîche.*

On observe un renforcement de la couleur jaune de façon significative avec l'augmentation de la puissance microondes. Cela pourrait s'expliquer par la dégradation du lycopène avec l'augmentation de la puissance microondes, rendant ainsi la tomate plus jaune. Lorsque la tomate est traitée à faible puissance (3W/g) la couleur jaune de la tomate est comparable à celle de la tomate fraiche, permettant alors une bonne préservation du lycopène. Pour le paramètre b* responsable de la coloration jaune, la tomate commerciale ivoirienne tend vers le bleu avec sa valeur négative et la tomate italienne a une valeur de b* plus faible que les tomates traitées par MOAC et la tomate fraîche, ce qui explique son assombrissement.

En somme, la stratégie de séchage MOAC avec pilotage de la puissance spécifique en continu permet d'améliorer la qualité rouge de la tomate comparativement aux tomates commerciales.

- Le paramètre qualité de la couleur a*/b*

Le paramètre a*/b* indique une bonne qualité de la tomate lorsque sa valeur est faible (**Sacilik, Keskin, & Elicin,** 2006). La figure 3.18d présente ce paramètre a*/b* de la tomate fraîche, séchée par MOAC (40°C) avec régulation de la puissance spécifique en continu, et séchée par le soleil (tomates commerciales).

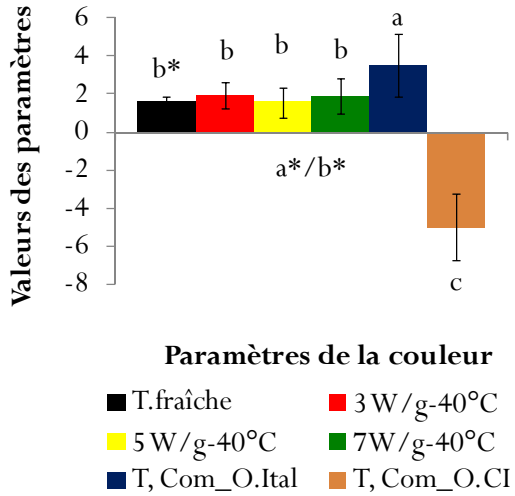



**Figure 3.18d-** *Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre a*/b* des demi-tomates séchées par MOAC (40°C) pour différentes puissances spécifiques. Comparaison du paramètre a*/b* de la tomate fraiche, séchée par MOAC et des tomates commerciales italienne et ivoirienne.*

** les barres du paramètre ayant les lettres différentes sont significativement différents (P<0,05). T.Com_OItal = Tomate commerciale : Origine Italie ; T.Com_CI = Tomate commerciale : Origine côte d'Ivoire. T. fraîche = Tomate fraîche.*

A l'analyse du paramètre a*/b* (figures 3.18d) il ressort que les tomates séchées à 3, 5 et 7 W/g, à la température de l'air de 40°C, ne sont pas différentes en qualité de couleur à la tomate fraîche. Quant à la tomate commerciale italienne sa valeur de a*/b* est significativement plus élevée que celle de la tomate fraîche ; donc de moins bonne qualité de couleur. Par contre la tomate commerciale ivoirienne est très sombre (figure 3.18d) à juger par sa valeur négative de a*/b* ( Sacilik, Keskin, & Elicin, 2006).

Au regard du paramètre a*/b* de la couleur, on peut dire que le séchage MOAC avec pilotage de la puissance spécifique permet d'obtenir une tomate de meilleure qualité comparée aux tomates de référence italienne et ivoirienne.

- La saturation (intensité de la couleur) : paramètre $C^*$

La figure 3.18e représente l'évolution du paramètre C* relatif à la saturation de couleur de la tomate fraiche et séchée par MOAC (40°C) avec pilotage de la puissance spécifique en continu, puis des tomates commerciales italienne et ivoirienne.

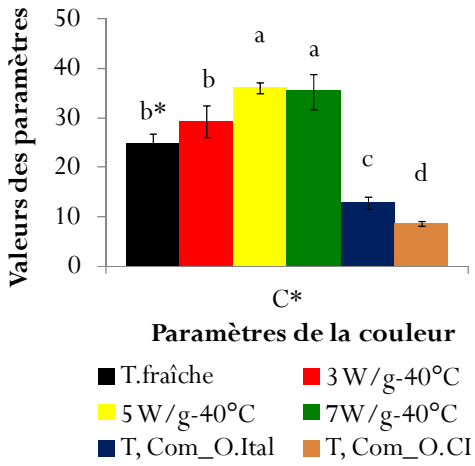



**Figure 3.18e-** *Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre C* (saturation) des demi-tomates séchées par MOAC (40°C) pour différentes puissances spécifiques. Comparaison du paramètre C* de la tomate fraiche, séchée par MOAC et des tomates commerciales italienne et ivoirienne.*

** les barres du paramètre ayant les lettres différentes sont significativement différents (P<0,05). T.Com_OItal = Tomate commerciale : Origine Italie ; T.Com_CI = Tomate commerciale : Origine côte d'Ivoire. T. fraîche = Tomate fraîche..*

Les valeurs obtenues pour la saturation C* viennent confirmer les résultats obtenus pour le paramètre a*. Ainsi on observe une augmentation significative (P< 0,05) de la saturation pour les tomates traitées par MOAC (40°C) quelque soit la puissance spécifique. Les saturations en couleur rouge des tomates commerciales (italienne et ivoirienne) demeurent significativement faibles. Il y a donc eu amélioration de la saturation de la couleur rouge des tomates séchées au MOAC par rapport aux tomates commerciales de référence et même de la tomate fraîche.
Pour ce qui est de l'influence de la puissance sur la couleur de la tomate séchée par MOAC, on observe une augmentation de la saturation avec la puissance spécifique microondes.

- L'angle de teinte : paramètre h°

La figure 3.18f représente l'évolution du paramètre h° relatif à la l'angle de teinte de la tomate fraiche et séchée par MOAC (40°C) avec pilotage de la puissance spécifique en continu, puis des tomates commerciales italienne et ivoirienne.

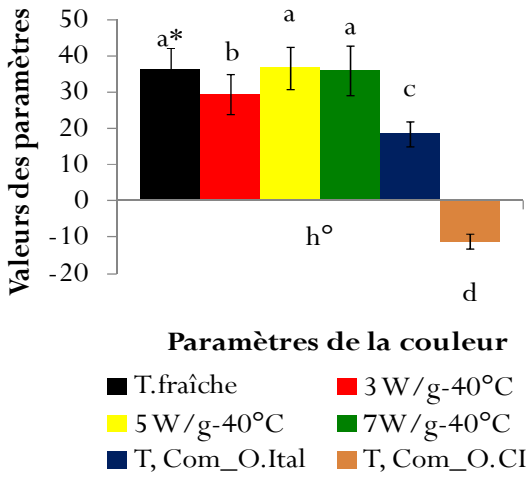



**Figure 3.18f-** *Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre h° (angle de teinte) des demi-tomates séchées par MOAC (40°C) pour différentes puissances spécifiques. Comparaison du paramètre h° de la tomate fraiche, séchée par MOAC et des tomates commerciales italienne et ivoirienne.*

** les barres du paramètre ayant les lettres différentes sont significativement différents (P<0,05). T.Com_OItal = Tomate commerciale : Origine Italie ; T.Com_CI = Tomate commerciale : Origine côte d'Ivoire. T. fraîche = Tomate fraîche.*

Lorsqu'un produit a un angle de teinte *h°* compris entre 18 et 54°, sa teinte est rouge (**Minolta KONIKA**, 2003). L'examen de la figure 3.18f confirme que la tomate fraîche est de teinte rouge (30° < h° < 40 °) ainsi que les tomates séchées par MOAC (40°C) quelque soit la puissance spécifique. Aussi nous constatons que la tomate séchée à puissance spécifique élevée, permet de préserver la teinte rouge de la tomate. En effet les valeurs de *h°* observées pour les traitements à 5 et 7 W/g ne sont pas significativement différentes (P > 0,05) de celle de la tomate fraîche. Par contre la tomate séchée à 3 W/g a est légèrement moins rouge. Cela pourrait être dû au temps de séchage qui est plus long à 3 W/g, donc plus néfaste à la coloration rouge.

Pour la tomate commerciale italienne, elle a un angle de teinte de 18,54° donc légèrement au dessus de la couleur rouge pourpre (mélange du rouge et du bleu). Quant à la tomate commerciale ivoirienne, elle a un angle de teinte de -10°, donc véritablement dans le rouge pourpre ou violet (compris entre -18°et +18°) et donc très sombre. Les tomates séchées par MOAC sont donc nettement meilleures en teinte rouge comparées aux tomates commerciales.

Les photos présentées à la figure 3.19 permettent une comparaison visuelle entre les tomates séchées par MOAC avec pilotage en continu de la puissance spécifique à différentes conditions de séchage et celles des tomates commerciales (italienne et ivoirienne).



a-Tomate séchée à 3 W/g-30°C



b -Tomate séchée à 5 W/g-30°C



c -Tomate séchée à 7 W/g-30°C



d- Tomate séchée à 3 W/g-40°C



e-Tomate séchée à 5 W/g-40°C



f-Tomate séchée à 7 W/g-40°C



g-Tomate séchée à 3 W/g-50°C



h-Tomate séchée à 5 W/g-50°C



i-Tomate séchée à 7 W/g-50°C



j- Tomate commerciale italienne séchée au soleil



k- Tomate commerciale ivoirienne séchée au soleil

**Figure 3.19-** *Photos des tomates séchées par MOAC avec régulation de la Ps en continu à différentes conditions de séchage comparées à celles des tomates commerciales séchées au soleil (j : origine Italie ; k : origine Côte d'Ivoire).*

Il est clair qu'il y a une nette amélioration visuelle des tomates séchée par MOAC avec pilotage en continu de la puissance spécifique. En effet, les points noirs liés aux surchauffes localisées qui apparaissaient dans le cas du séchage MOAC sans régulation de la puissance spécifique ont disparus. Par ailleurs, la couleur des tomates séchées par MOAC est plus attrayante que celle des tomates commerciales séchées au soleil.

### III.2.1.4.2- Texture

L'étude de la texture porte sur la force maximale de pénétration du produit sec rapportée à celle du produit frais. Les résultats sont illustrés sur la figure 3.20.

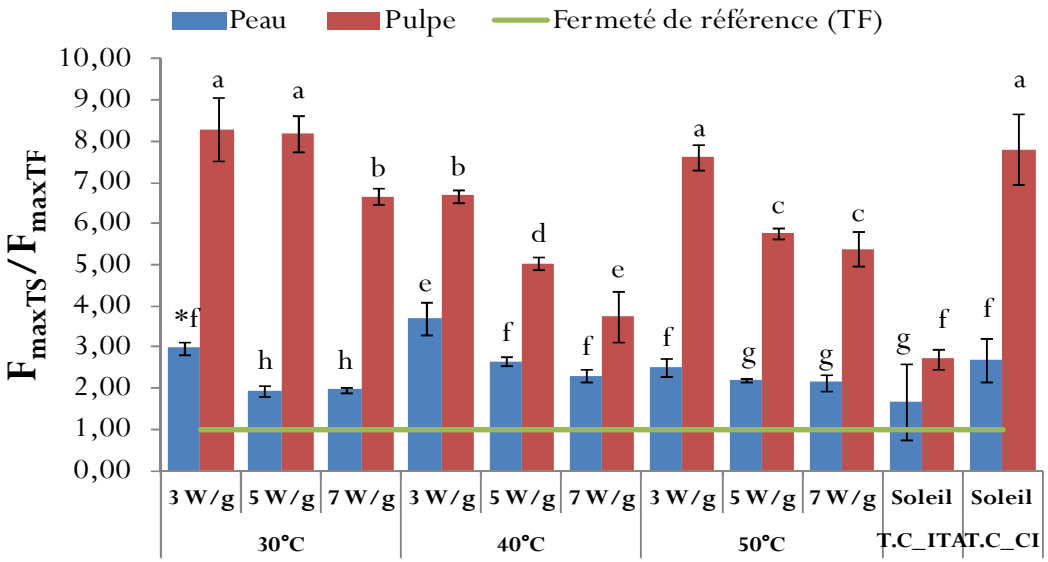



**Figure 3.20-** *Effet de la puissance spécifique et de la température de l'air sur la fermeté de la tomate séchée à différentes conditions. Comparaison avec les tomates commerciales d'origine italienne et ivoirienne.*

** les barres du paramètre ayant les lettres différentes sont significativement différents (P<0,05). T.C_ITA = Tomate commerciale : Origine Italie ; T.C_CI = Tomate commerciale : Origine côte d'Ivoire.*

Les résultats nous révèlent des changements apparus lors du traitement MOAC avec pilotage de la puissance spécifique, car les différentes valeurs du rapport des forces sont tous supérieurs à 1 (**Heredia, Barrera, & Andrés**, 2007). Cela signifie que les tomates séchées sont tous devenues plus fermes que la tomate fraîche (dont la fermeté est représentée sur le graphique par la ligne verte). Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'après la déshydratation, les groupements carboxyliques non-méthoxylés (i.e.libres) peuvent être réticulés par le biais des ions calcium naturellement présents dans le tissu de la tomate, augmentant ainsi l'adhésion intercellulaire. Ce qui rend le produit plus ferme en fin de traitement (**Anthon & Barrett,** 2010). A la figure 3.20, on observe une influence de la puissance microondes (MO) sur la texture. En effet plus la puissance est élevée, moins la tomate est ferme en fin de séchage, aussi bien au niveau de la pulpe que de la peau. Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'à puissance élevée la pulpe est plus dégradée ce qui procure moins de substance pulpeuse à la tomate et une structure moins resserrée, d'où une moins grande résistance à la pénétration. Ce phénomène est observable à

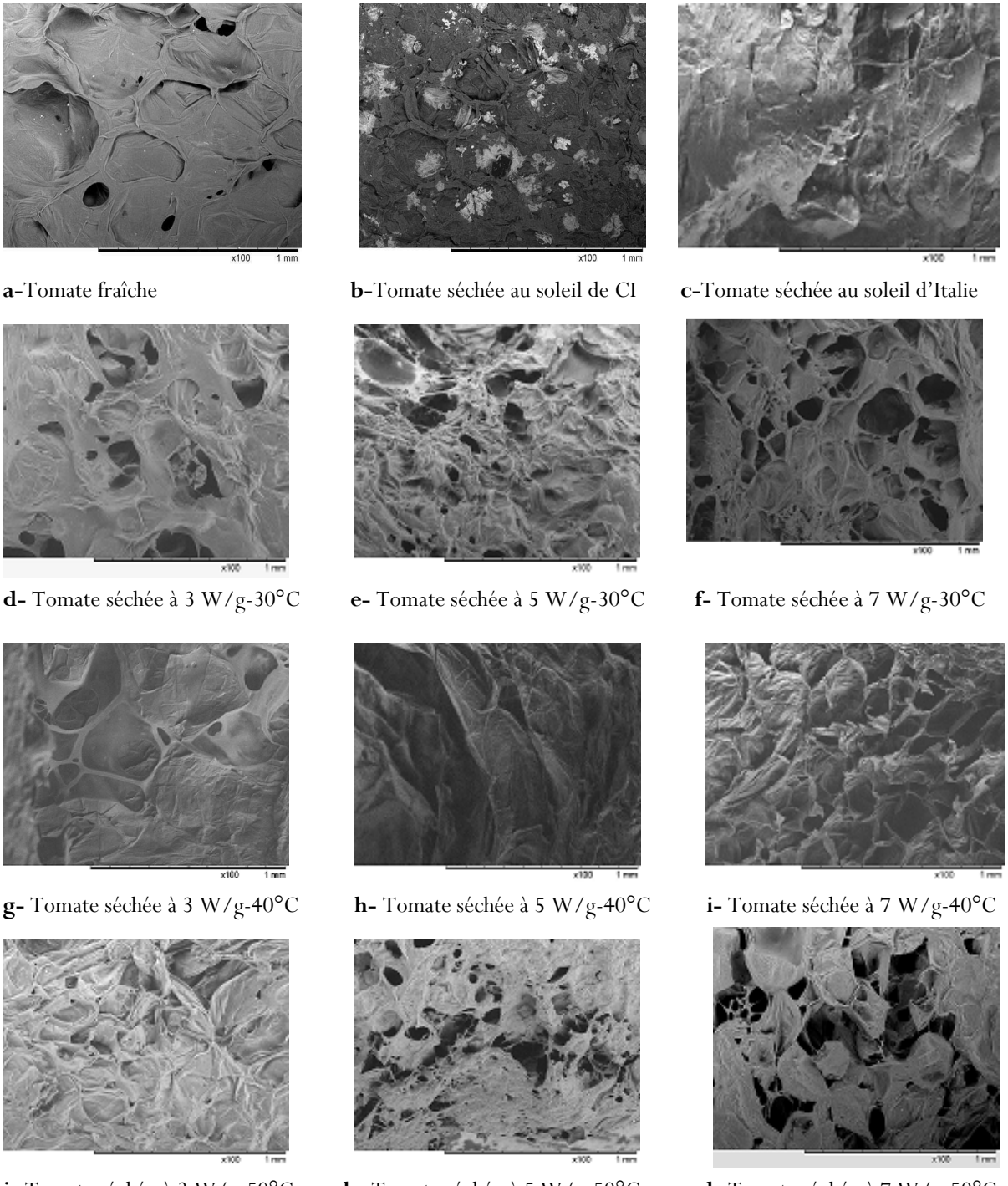
l'œil nu, toutefois, une étude sur la structure par microscopie électronique à balayage (MEB) le montre bien. On aperçoit en effet, la présence d'une structure plus poreuse lorsque la tomate est séchée à des puissances plus élevées. Globalement, on observe aussi que la pulpe est plus ferme que la peau comme l'ont aussi observé (**Heredia, Barrera, & Andrés**, 2007).

La tomate commerciale italienne est moins ferme (peau et pulpe) que les tomates traitées par MOAC. C'est par ailleurs la fermeté recherchée pour la tomate séchée (i.e. celle qui est plus proche de la fermeté de référence). Cela serait dû à l'utilisation du sel (NaCl) utilisé pour le séchage de la tomate italienne. En effet le prétraitement osmotique au sel abouti à un assouplissement général de la tomate, comme cela a été observé dans de nombreux autres produits (**Chiralt & Talens**, 2005). Quant à la tomate commerciale ivoirienne, la peau et la pulpe ont une fermeté comparable à celle traitée aux puissances MO basses : donc non appréciables.

Si l'on cherche une tomate séchée dont la fermeté se rapproche de celle de la tomate fraîche (i.e. ayant la valeur de $F_{maxTS}$ / $F_{maxTF}$ =1), c'est la tomate commerciale italienne qui est la meilleure. L'amélioration de la texture de tomate séchée par MOAC pourrait se faire par un prétraitement osmotique préalable comme l'ont déjà fait certains chercheurs (**Chiralt & Talens**, 2005 ; **Heredia, Barrera, & Andrés**, 2007). En effet la fermeté et la résistance au ramollissement résultant de la présence du calcium (intrinsèque à la tomate) peuvent être attribuées à la formation de pectates de calcium, qui augmente la rigidité de la lamelle moyenne des cellules végétales (**Luna-Guzman & Barrett**, 2000).

### III.2.1.4.3- Structure

Les micrographes électroniques à balayage réalisés sur les tomates séchées à différentes conditions de séchage microondes air chaud (MOAC), sont présentés à la figure 3.21.



**a-**Tomate fraîche **b-**Tomate séchée au soleil de CI **c-**Tomate séchée au soleil d'Italie

**d-** Tomate séchée à 3 W/g-30°C **e-** Tomate séchée à 5 W/g-30°C **f-** Tomate séchée à 7 W/g-30°C

**g-** Tomate séchée à 3 W/g-40°C **h-** Tomate séchée à 5 W/g-40°C **i-** Tomate séchée à 7 W/g-40°C

**j-** Tomate séchée à 3 W/g-50°C **k-** Tomate séchée à 5 W/g-50°C **l-** Tomate séchée à 7 W/g-50°C

**Figure 3.21**- *Micrographies (x100 mm) des échantillons de tomate séchés au MOAC avec pilotage de la puissance spécifique à différentes conditions de séchage, comparées à celles des tomates du commerce d'origine italienne et ivoirienne.*

La figure 3.21 montre les morphologies des tomates séchées aux puissances spécifiques microondes de 3, 5 et 7 W/g combinées successivement aux températures de 30, 40 et 50°C.
A l'analyse de la figure 3.21a, on observe que l'échantillon de tomate fraiche présente distinctement des cellules parenchymateuses denses avec quelques pores par endroits.
Après le séchage, les échantillons de tomates présentent globalement une structure différente de celle de la tomate fraîche. La formation de pore après le séchage est probablement due à la formation d'un flux de vapeur d'eau à l'intérieur des échantillons, qui engendre un développement de la pression entrainant une rupture internes des tissus avec pour résultat la formation de pores. Ces pores pourraient affecter non seulement les propriétés de transport telles que les diffusivités des gaz et des liquides dans les échantillons, mais également la texture croquante des échantillons (**Prachayawarakorn *et al.,*** 2008). Comme le montre la figure 3.21, les pores obtenus sont irréguliers dans la forme et aléatoires dans la taille. Le développement de pores est fortement lié à la puissance microonde et la température de l'air de séchage. Les échantillons de tomate fortement poreux ont été obtenus avec les puissances de 7 W/g (figures 3.21f, i et l), donnant des pores de taille supérieures à 1 mm. Les échantillons de tomates séchées sont peu et moyennement poreux aux puissances basses (3 W/g) (figures 3.21d, g et j) et moyennes (5 W/g) (figures 3.21e, h et k). Cela confirme bien les différentes courbes de séchage observées aux différentes puissances spécifiques. Par ailleurs, l'influence de la température de l'air de séchage (à 30, 40 et 50°C) sur la microstructure n'est pas clairement évidente. Cela a aussi été rapporté par **Therdthai & Zhou**, (2009), lors de séchage à l'air chaud de la feuille de menthe à 60 et 70°C. Une différence non significative au niveau de la structure était également rapportée sur le riz cuit séché respectivement à 50°C, à 80°C et à 120°C, (**Luangmalawat *et al.,*** 2008).
Concernant, les tomates commerciales d'origine ivoirienne et italienne (figures 3.21b et c), on observe moins de pores que sur l'échantillon de tomate fraîche. On peut donc dire de ces échantillons, qu'ils ont moins de structure et pores ouverts que ceux séchés par MOAC, indiquant le rétrécissement et la dégradation sévère de tissus pendant le séchage au soleil (**Giri & Prasad**, 2007). Cependant, le faible rétrécissement des échantillons séchés par MOAC peut être dû au temps de séchage plus court, et à une certaine expansion de tissu provenant de la vapeur d'eau interne (**Bilbao-Sainz *et al.,*** 2006). En effet selon **Therdthai & Zhou** (2009), l'accentuation de la porosité de la structure est probablement due à la vaporisation massive et rapide d'eau pendant le séchage micro-onde. Les bulles de vapeur d'eau ont pu augmenter le gradient de pression total à l'intérieur de la tomate et ont donc augmenté la porosité. L'augmentation de la puissance microondes tend à augmenter la vitesse d'évaporation, empêchant de ce fait le rétrécissement et le durcissement.

### III.2.1.4.4- Taux résiduel de lycopène

La figure 3.22 met en évidence l'influence de la puissance spécifique sur le taux résiduel en lycopène au cours du séchage MOAC en pilotage continu à la température de 40°C et la comparaison de ce taux avec celui des tomates de référence.
Les résultats pour les tomates séchées à différentes puissances spécifiques microondes (3, 5, et 7W /g) liées aux températures d'air de 30 et 50°C suivent les mêmes tendances que celles de la figure 3.22, et sont présentés en annexe IV.

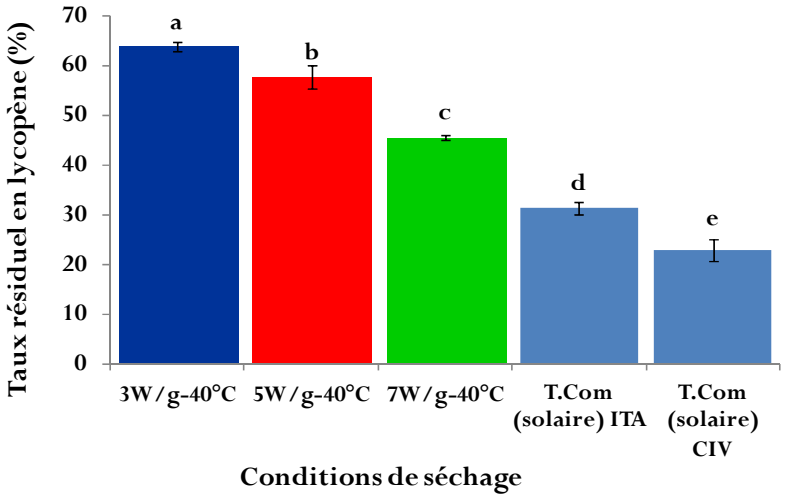



**Figure 3.22-** *Effet de la puissance MO sur la teneur en lycopène résiduel de la tomate séchée par MOAC (à 40°C) avec régulation de Ps à différentes conditions de séchage. Comparaison du taux résiduel en lycopène des tomates séchées par MOAC (40°C) et des tomates commerciales.*

** les barres pour les taux résiduels ayant les lettres différentes sont significativement différents (P<0,05). T.Com_ITA= Tomate commerciale : Origine Italie ; T.Com_CIV = Tomate commerciale : Origine côte d'Ivoire.*

A l'analyse des figures 3.22, il ressort que la teneur en lycopène résiduelle est significativement influencée à la baisse par la puissance microondes. Selon plusieurs auteurs, les principales causes de dégradation du lycopène, au cours de la déshydratation des produits, sont l'isomérisation et l'oxydation (**Shi *et al.***, 1999 ; **Heredia *et al.,*** 2010 ; **Mayer-Miebach *et al.,*** 2005; **Chen *et al.,*** 2009 ; **Boskovic**, 1979 ; **Lovrić, Sablek, & Bošković**,1970). L'isomère *all-trans* du lycopène est le plus abondant dans la tomate fraîche (90-98%) (**Nguyen & Schwartz**, 1998). Au cours du séchage, la chaleur favorise la formation des isomères *cis* instables dans la tomate entraînant donc une réduction des *all-trans* lycopène plus stables. Aussi un traitement thermique de longue durée est favorable à l'oxydation du lycopène. Mais dans notre étude ce n'est pas le cas, car quelque soit la puissance microondes utilisée le séchage est plus rapide que le séchage à l'air chaud et au soleil. Un traitement à puissance MO élevée entraînerait une montée en

température et une désintégration plus rapide et prononcée des tissus de la tomate (comme le montre les microstructures vues au III.2.1.4.3), exposant ainsi les tissus de la tomate à une isomérisation *trans-cis* et à une oxydation plus importante. Il s'en suit donc une destruction plus importante du lycopène (**Shi *et al.*,** 1999) à puissance microondes élevée.

Les tomates commerciales ont des taux de lycopène résiduel significativement inférieurs à ceux des tomates traitées par MOAC. Ceci est lié au temps du séchage solaire trop long (4- 5 jours) ( **Sacilik, Keskin, & Elicin,** 2006), les exposant de ce fait à l'action prononcée de l'oxydation.

L'étude de l'influence de la température sur la dégradation du lycopène est présentée à la figure 3.23.

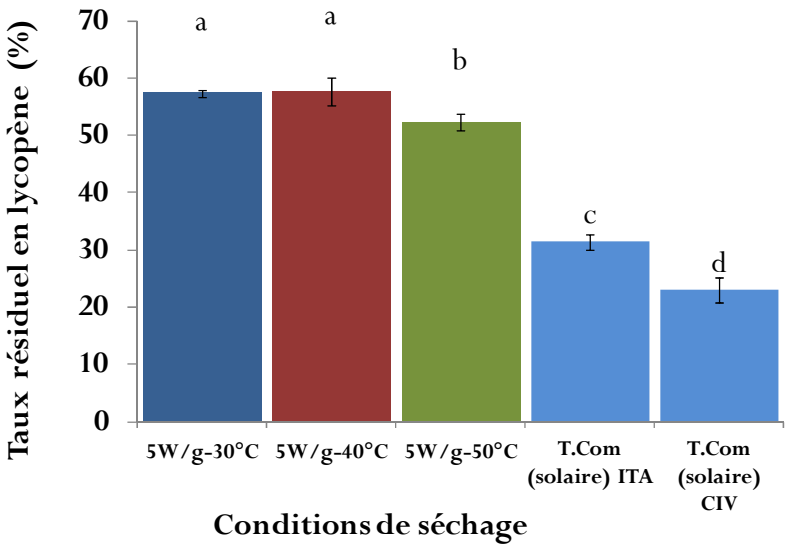



**Figure 3.23-** *Effet de la température sur le taux résiduel en lycopène de la tomate séchée par MOAC (à 5 W/g et température d'air variable) avec régulation de Ps à différentes conditions de séchage. Comparaison du taux résiduel en lycopène des tomates séchées par MOAC (à 5W/g) et des tomates commerciales.*

** les barres pour les taux résiduels ayant les lettres différentes sont significativement différents (P<0,05). T.Com_ITA= Tomate commerciale : Origine Italie ; T.Com_CIV = Tomate commerciale : Origine côte d'Ivoire.*

L'analyse globale des figures 3.23, révèle que les basses températures (< 50 °C) n'influencent pas le taux résiduel en lycopène. Ce résultat est en conformité avec celui de (**Mayer-Miebach *et al.*,** 2005) qui ont rapporté que le traitement à une température de l'air en dessous de 70°C n'affecte pas la teneur en lycopène de la carotte, même après un traitement de 5 heures. Néanmoins, quelque soit la température de séchage des tomates par MOAC à la puissance spécifique de 5 W/g, le taux résiduel en lycopène reste supérieur à celui des tomates commerciales.

En conclusion nous pouvons donc affirmer que globalement la technologie MOAC avec pilotage de puissance spécifique permet efficacement de préserver le lycopène de la tomate à un taux

largement supérieur à celui des tomates commerciales séchées au soleil. Aussi, l'utilisation de puissance et de température très élevées est plus favorable à la dégradation du lycopène de la tomate.

## III.2.2 – COMPARAISON DU SECHAGE MOAC EN PILOTAGE CONTINU ET PAR INTERMITTENCE

Après avoir montré l'amélioration de la qualité physicochimique de la tomate séchée par MOAC avec pilotage de la puissance spécifique en continu chaque seconde (mode 1), nous l'avons comparée en termes de qualité et de consommation énergétique au mode 2, qui consiste à réguler la puissance spécifique par intermittence de 5 min.

### III.2.2.1-COMPARAISON DE LA QUALITE

La comparaison des caractères physico-chimiques a été réalisée sur la couleur, la texture et le taux résiduel en lycopène.

#### III.2.2.1.1- Couleur

L'étude comparative des effets des deux stratégies de séchage MOAC sur la couleur de la tomate séchée, est faite au tableau 3.4. On voit qu'aucun paramètre de la couleur ($L^*$, $a^*$, $b^*$, $a^*/b^*$, $C^*$, h°) n'est influencé par le mode de séchage. Cela pourrait s'expliquer par la durée du séchage qui n'est pas trop différente d'un mode de séchage à l'autre.

**Tableau 3.4-** *Comparaison des paramètres de la couleur entre le séchage MOAC en pilotage continu et par intermittence*

| Mode de séchage | Tempéra. de l'air (°C) | Puissance MO (W/g) | $L^*$ | $a^*$ | $b^*$ | $a^*/b^*$ | $C^*$ | h° |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mode 1 | 30°C | 3W/g | 42,15 (2,85)$^{a}$ | 26,02 (2,84)$^{d}$ | 18,84 (4,72)$^{e}$ | 1,78 (0.90)$^{f}$ | 33,18 (4,43)$^{c}$ | 34,38 (4,48)$^{b}$ |
| | | 5W/g | 40,15 (3,92)$^{a}$ | 27,45 (2,30)$^{d}$ | 21,10 (4,41)$^{e}$ | 1,35 (0.35)$^{f}$ | 34,84 (1,39)$^{c}$ | 37,39 (4,85)$^{b}$ |
| | | 7W/g | 40,61 (2,71)$^{a}$ | 27,96 (4,11)$^{d}$ | 21,49 (3,66)$^{e}$ | 1,56 (1,00)$^{f}$ | 36,08 (2,25)$^{c}$ | 37,08 (4,95)$^{b}$ |
| Mode 2 | 30°C | 3W/g | 39,82 (4,59)$^{a}$ | 24,23 (4,52)$^{d}$ | 16,17 (6,38)$^{e}$ | 1,65 (0,62)$^{f}$ | 29,56 (4,82)$^{c}$ | 33,23 (4,82)$^{b}$ |
| | | 5W/g | 42,53 (3,94)$^{a}$ | 25,40 (2,87)$^{d}$ | 21,32 (5,91)$^{e}$ | 1,54 (0,77)$^{f}$ | 35,66 (5,26)$^{c}$ | 36,46 (5,68)$^{b}$ |
| | | 7W/g | 44,90 (5,44)$^{a}$ | 27,43 (2,79)$^{d}$ | 22,88 (7,07)$^{e}$ | 1,16 (0.26)$^{f}$ | 34,32(6,75)$^{c}$ | 41,19 (1,05)$^{b}$ |
| Mode 1 | 40°C | 3W/g | 39,69 (3,73)$^{a}$ | 25,25 (4,48)$^{d}$ | 14,17 (4,45)$^{e}$ | 1,92 (0,70)$^{f}$ | 29,29 (3,19)$^{c}$ | 34,48 (5,36)$^{b}$ |
| | | 5W/g | 38,87 (2,42)$^{a}$ | 27,91(6,92)$^{d}$ | 20,89 (5,77)$^{e}$ | 1,56 (0,81)$^{f}$ | 36,02 (1,20)$^{c}$ | 36,69 (5,88)$^{b}$ |
| | | 7W/g | 43,28 (4,60)$^{a}$ | 26,79 (3,98)$^{d}$ | 20,66 (2,43)$^{e}$ | 1,66 (0,25)$^{f}$ | 34,42 (3,51)$^{c}$ | 34,86 (6,85)$^{b}$ |
| Mode 2 | 40°C | 3W/g | 41,88 (1,84)$^{b}$ | 26,38 (4,26)$^{d}$ | 15,42 (3,57)$^{e}$ | 1,80 (0,58)$^{f}$ | 30,81 (2,79)$^{c}$ | 30,55 (4,16)$^{b}$ |
| | | 5W/g | 45,62 (2,81)$^{a}$ | 21,45 (3,51)$^{d}$ | 14,86 (3,40)$^{e}$ | 1,46 (0,16)$^{f}$ | 26,11 (4,71)$^{c}$ | 34,55 (2,89)$^{b}$ |
| | | 7W/g | 45,60 (0,98)$^{a}$ | 26,91 (1,20)$^{d}$ | 20,24 (5,15)$^{e}$ | 1,52 (0,57)$^{f}$ | 34,20 (7,05)$^{c}$ | 35,36 (3,92)$^{b}$ |
| Mode 1 | 50°C | 3W/g | 41,91 (3,05)$^{a}$ | 26,88 (3,88)$^{d}$ | 21,24 (5,67)$^{e}$ | 1,45 (0,57)$^{f}$ | 34,64 (4,16)$^{c}$ | 35,37 (5,69)$^{b}$ |
| | | 5W/g | 39,98 (3,96)$^{a}$ | 23,24 (3,96)$^{d}$ | 14,91 (5,90)$^{e}$ | 2,07 (0,35)$^{f}$ | 28,20 (5,52)$^{c}$ | 34,00 (2,87)$^{b}$ |
| | | 7W/g | 42,78 (3,41)$^{a}$ | 22,87 (3,41)$^{d}$ | 16,16 (5,14)$^{e}$ | 1,85 (0,96)$^{f}$ | 28,82 (3,43)$^{c}$ | 33,50 (4,16)$^{b}$ |
| Mode 2 | 50°C | 3W/g | 46,15 (1,37)$^{a}$ | 26,04 (0,99)$^{d}$ | 22,90 (2,74)$^{e}$ | 1,15 (0,14)$^{f}$ | 34,72 (2,00)$^{c}$ | 41,23 (3,46)$^{b}$ |
| | | 5W/g | 40,93 (4,67)$^{a}$ | 25,54 (4,72)$^{d}$ | 22,93 (6,07)$^{e}$ | 1,21 (0,54)$^{f}$ | 35,01 (3,15)$^{c}$ | 42,04 (4,26)$^{b}$ |
| | | 7W/g | 43,63 (4,22)$^{a}$ | 25,87 (1,17)$^{d}$ | 22,73 (4,45)$^{e}$ | 1,27 (0,48)$^{f}$ | 34,86 (2,86)$^{c}$ | 39,87 (2,89)$^{b}$ |

L: blanc (+100)/noir (+0), a: rouge (+60)/vert (-60) , b: jaune (+60)/bleu (-60), C: chroma, h°: angle de teinte.Les valeurs dans les colonnes représentent les moyennes de 3 essais à différentes conditions de séchage MOAC. Les valeur entre les parenthèses sont les écart-types entre les essais. Les lettres en exposant sur les chiffres signifient que les valeurs sont significativement différents si les lettres sont différentes ($P<0,05$).

### III.2.2.1.2- Texture

Les graphes de la figure 3.24 présentent la comparaison des différentes fermetés ($F_{maxTS}/F_{maxTF}$) de la peau et de la pulpe de la demi-tomate séchée par MOAC (40°C) avec pilotage de la puissance spécifique en continu (mode1) et par intermittence de 5 minutes (mode 2). Les graphes obtenus pour ces puissances spécifiques associées aux températures d'air de 30 et 50°C suivent les mêmes tendances, et sont présentés en annexe VI.

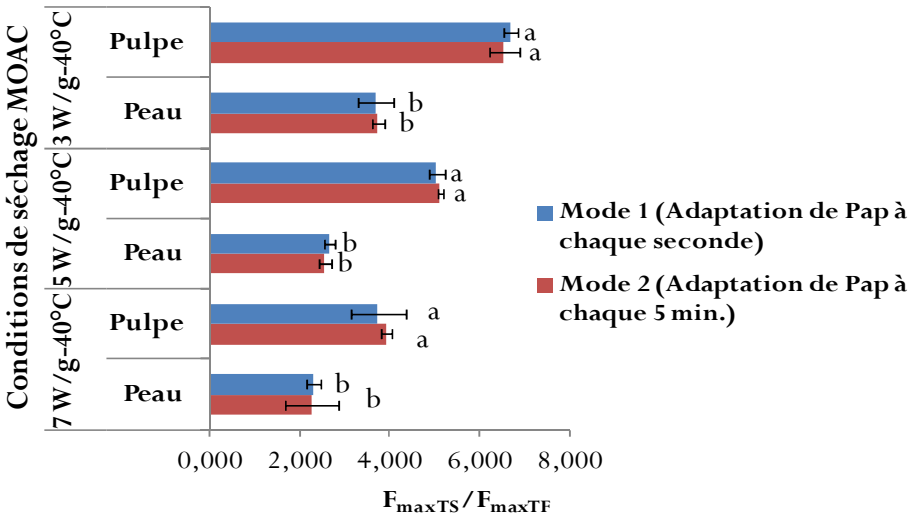



**Figure 3.24-** *Comparaison de la texture obtenue par séchage MOAC (40°C) de la tomate au cours des modes de pilotage de la puissance spécifique : adaptation de Pap à chaque seconde (mode 1) et adaptation de Pap par intermittence de 5 min (mode 2).*

A l'analyse de la figure 3.24, il ressort globalement que le mode de régulation n'influence pas la structure de la peau ni de la pulpe de la tomate séchée par MOAC quelque soient les niveaux de puissance et de température. Cela peut être dû au fait que le mode de séchage n'influence pas véritablement la structure de la tomate séchée, comme le montre un exemple de structure observée à la MEB à 3W/g-40°C (figure 3.25).




**Figure 3.25-** *Structure de la tomate séchée vue au microscope électronique à balayage (x100 mm) à 3 W/g-40°C : a- en pilotage de Ps par adaptation de Pap à chaque 1 seconde ; b-pilotage de Ps par adaptation de Pap par intermittence de 5 minutes.*

En résumé les modes de régulation 1 et 2 n'ont aucune influence significative sur la couleur et la texture de la tomate séchée.

### III.2.2.1.3- Taux résiduel de lycopène

Les résultats des taux résiduels en lycopène à différentes puissances spécifiques (3, 5, 7 W/g) associées à différentes températures sont présentés à la figure 3.26.

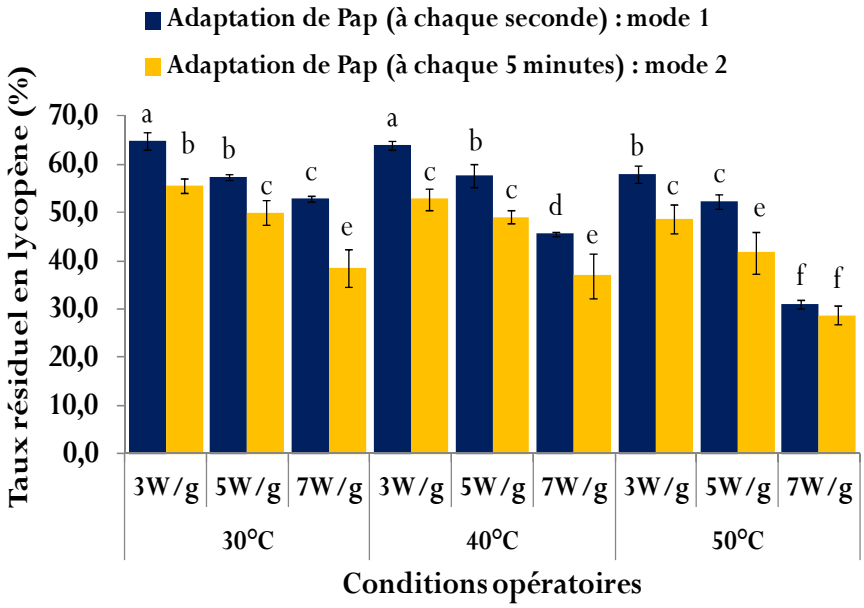



**Figure 3.26-** *Effet des deux modes d'adaptation de la puissance appliquée proportionnellement à la masse du produit sur la teneur en lycopène résiduel au cours du séchage MOAC de la demi-tomate*

A l'examen de la figure 3.26, il ressort que globalement, le taux résiduel en lycopène est faible pour le mode de régulation par intermittence (mode 2). Cela pourrait s'expliquer peut être, par le temps de régulation qui maintient plus longtemps la puissance appliquée constante plus forte que nécessaire, sur la tomate, ce qui augmenterait la vitesse d'estérification du lycopène et donc une dégradation de celui-ci. Le mode 2 de séchage donne un résultat souvent comparable à celui du mode 1 à température et puissance plus élevée (7 W/g-50°C), i.e. au plus fort couple puissance-température.

Au terme de cette étude comparative entre les deux modes de séchage microondes air chaud, nous pouvons conclure que seule la composition chimique (taux résiduel en lycopène) est affectée négativement au cours du séchage avec pilotage de la puissance spécifique par intermittence, ce qui est suffisant pour nous faire préférer la mode 1. Cela pourrait être du à la thermo-sensibilité du lycopène.

### III.2.2.2-COMPARAISON DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE MASSIQUE (CEM)

#### III.2.2.2.1- CEM en pilotage continu (CEMc)

La consommation énergétique massique CEM a été déterminée à partir du rapport de la consommation énergétique globale et de la masse d'eau évaporée à l'issue d'une teneur en eau finale d'environ 22 ±5%. La figure 3.27 représente cette CEM en adaptation de la puissance appliquée proportionnellement à la masse du produit à chaque seconde.

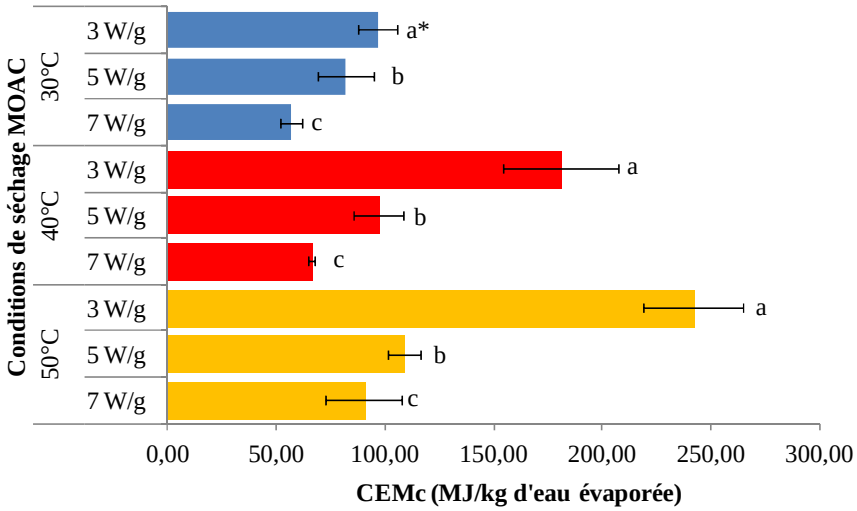



**Figure 3.27-** *Consommation énergétique massique totale au cours du séchage MOAC avec pilotage de Ps par adaptation de Pap proportionnellement à la masse du produit à chaque seconde, à différentes conditions de séchage. *Les barres de CEMc même couleur, portant des lettres différentes sont significativement différentes ($p < 0,05$).*

L'analyse de la figure 3.27, montre que la consommation énergétique massique diminue de 241,89 à 56,53 à MJ/kg d'eau évaporée lorsque la puissance spécifique microondes Ps croit de 3 à 7 W/g et que la température décroit de 50 à 30°C. L'influence de la puissance spécifique sur la CEMc, s'explique par la réduction du temps de séchage lorsque Ps augmente. L'influence de la température, elle due à la résistance chauffante qui consomme plus d'énergie pour élever la température de 30 à 50°C. (**Sharma & Prasad**, 2006b) ont observé les mêmes phénomènes au cours du séchage à l'air chaud de la gousse d'ail, où la CEM diminuait de 214,51 à 139,54 MJ/kg d'eau évaporée entre 40 et 70°C. Dans notre cas, l'augmentation de la puissance spécifique à 7W/g et la diminution de la température à 30°C permet de réduire la CEM de 76,63%.

On peut donc conclure que, pour réaliser une économie en énergie au cours du séchage MOAC en pilotage continu (mode de régulation continu), il est souhaitable de coupler une forte puissance et une faible température.

### III.2.2.2.2- CEM en pilotage par intermittence (CEMi)

la figure 3.28 représente la consommation énergétique massique au cours du séchage MOAC en régulation par intermittence (CEMi) à différentes puissances spécifiques et températures de l'air. Ici également, on observe qu'avec de ce mode de régulation 2 au cours du séchage MOAC la CEM diminue de 190,84 à 36,40 MJ/kg d'eau évaporée lorsque la puissance augmente de 3 à 7 W/g et que la température diminue de 50 à 30°C.

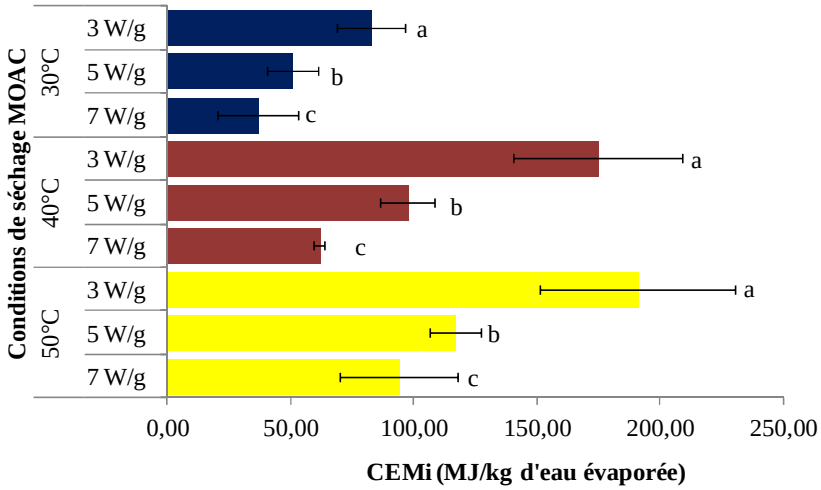



**Figure 3.28-** *Consommation énergétique massique totale au cours du séchage MOAC avec pilotage de Ps par adaptation de Pap proportionnellement à la masse du produit, chaque 5 minutes à différentes conditions de séchage. *Les barres de CEMi même couleur, portant des lettres différentes sont significativement différentes ($p < 0,05$).*

S'il est vrai qu'au regard des chiffres, la consommation énergétique massique est réduite en mode d'adaptation de Pap par intermittence de 5 min. qu'en mode d'adaptation de Pap chaque seconde, on observe cependant, les mêmes phénomènes d'influence de la puissance spécifique lors du séchage MOAC. On peut donc tirer les mêmes conclusions à savoir que pour réaliser des économies d'énergie, il faut utiliser un couple puissance forte et température faible, en mode d'adaptation de Pap par intermittence.

### III.2.2.3-COMPARAISON DES DIFFERENTES CEM ET CONCLUSION

L'objectif de cette comparaison des CEMc et CEMi est de distinguer le mode de régulation le moins énergétivore, afin de faire un choix en se basant aussi sur la qualité du produit. La figure 3.29 rend compte de cette comparaison.

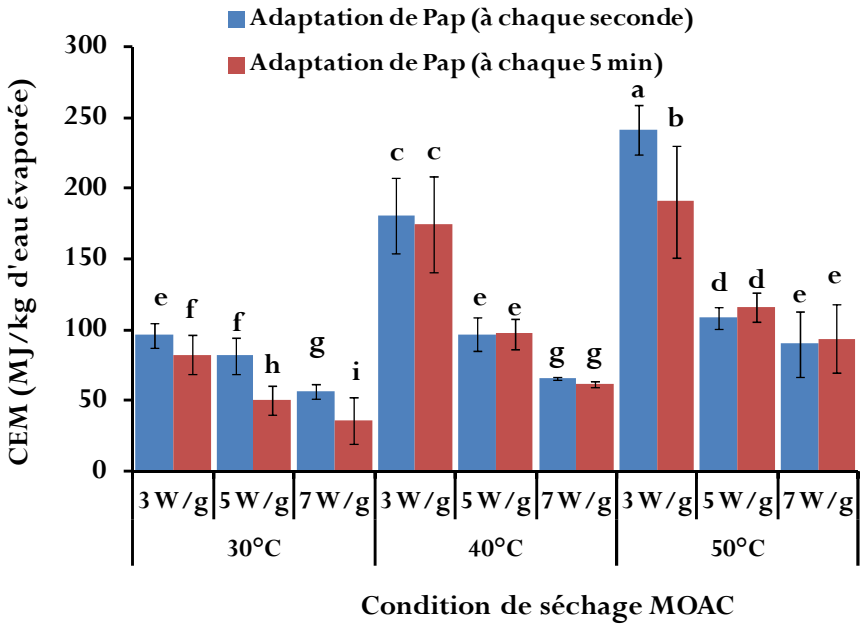



**Figure 3.29-** *Comparaison de la consommation énergétique massique en pilotage de la puissance spécifique (Ps) en continu (adaptation de la puissance appliquée chaque seconde) (CEMc) et par intermittence (adaptation de la puissance appliquée chaque 5 minutes) (CEMi)*.

Après examen de la figure 3.29, on note qu'à la température de l'air de 30°C, le mode 2 de séchage permet une économie d'énergie aux trois niveaux de puissance (3, 5 et 7W/g) respectivement de 14,49 - 38,23 et 35,61%, avec, une différence significative ($P<0,05$). Cela serait dû probablement à la réduction de temps de séchage au cours de ce mode 2. Car lorsque l'on passe d'une régulation d'une seconde à 5 minutes, la puissance appliquée reste constance et la puissance spécifique croit pendant 5 minutes avant d'être régulée à la proportionnelle de la masse. Donc logiquement plus d'eau doit être éliminée plus rapidement, comparativement au mode 1 (régulation chaque seconde). En fin de séchage on assiste alors à un gain en temps de séchage et donc en CEM. Par contre à la température de 40°C, on n'observe pas de différence significative au niveau des puissances pour la CEM. Pour cela seul l'élévation de la température pourrait l'expliquer, mais cela est difficile à confirmer. A 50°C on note là aussi que seule CEM à 3 W/g du mode 1 est significativement élevée que celle du mode 2.

CONCLUSION : Globalement l'adaptation de la puissance spécifique par le mode 2 est moins énergétivore que celle du mode 1, surtout à basse température. Il serait donc préférable de pratiquer le séchage MOAC avec pilotage de la puissance spécifique par intermittence à basse température plutôt qu'à haute température. Cependant le mode 2 est plus dégradant pour la qualité de la tomate. Alors nous proposons une optimisation du procédé MOAC qui prend en compte les deux modes de séchage (de la stratégie 2), afin de choisir celui qui convient le mieux à l'obtention d'une tomate de meilleure qualité finale au moindre coût.

## III.3- MODELISATION ET OPTIMISATION DU PROCEDE DE SECHAGE MICROONDES /AIR CHAUD

Ce chapitre est scindé en deux. La première partie vise à déterminer les coefficients de diffusion de l'eau dans des demi-tomates en vu de prévoir l'évolution des humidités pendant leur séchage. Pour cela, nous avons opté pour le modèle linéaire. Dans la littérature nous avons pu trouver des travaux de sur les isothermes de sorption de la tomate (**Akanbi, Adeyemi, & Ojo**, 2006) qui nous ont permis d'évaluer les différentes teneurs en eau d'équilibre aux différentes températures exploités dans ce travail. Ensuite six modèles de représentation de la littérature ont été testés afin de choisir celui qui simule le mieux les données expérimentales issues du séchage MOAC avec pilotage de *Ps*.
Dans la seconde partie de ce chapitre, il s'agit de réaliser une optimisation multi-objective en utilisant un compromis, à partir de la méthode des surfaces de réponse, qui optimise à la fois toutes les réponses liées au procédé de séchage et à la qualité du produit.

### III.3.1- MODELISATION ET SIMULATION DU PROCEDE

#### III.3.1.1-ETABLISSEMENT DES MODELES PREDICTIFS DU TRANSFERT HYDRIQUE

#### III.3.1.1.1- Modèles de la diffusivité apparente de l'eau

La diffusivité apparente $D_{ap}$ est typiquement calculée par la méthode graphique en représentant les données expérimentales du séchage en terme du logarithme népérien de la teneur en eau réduite ***Xr*** en fonction du temps de séchage (figure 3.30). La pente trouvée permet de déterminer les différentes valeurs de la diffusivité apparente présentées dans le tableau 3.5.

**Tableau 3.5-** *Valeurs des diffusivités apparentes ($D_{ap}$) obtenues pour la demi-tomate à différentes conditions de séchage MOAC avec pilotage de la Ps en continu chaque sec.*

| Ps (W/g) | Température (°C) | | |
|---|---|---|---|
| | 30 | 40 | 50 |

| | $D_{ap}$(x10$^{-8}$ m²/s) | R² | $D_{ap}$(x10$^{-8}$ m²/s) | R² | $D_{ap}$(x10$^{-8}$ m²/s) | R² |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **3** | 1,7217 ± 0,0730 | 0,9905 | 2,2080 ± 0,4829 | 0,9897 | 2,5679 ± 0,3052 | 0,9901 |
| **5** | 3,3752 ± 1,0782 | 0,9714 | 3,4239 ± 0,1677 | 0,9754 | 5,1358 ± 0,6521 | 0,9974 |
| **7** | 4,9607 ± 0,2529 | 0,9351 | 6,5753 ± 0,0919 | 0,9828 | 7,3243 ± 0,2733 | 0,9712 |

Le tableau 3.5 donne les valeurs moyennes des diffusivités apparentes obtenues au cours du séchage MOAC (avec pilotage de Ps en continu) de la demi-tomate. On note une augmentation de $D_{ap}$ avec la puissance des microondes appliquée et la température de l'air de séchage. En effet l'augmentation de la puissance et de la température accélère le transfert et l'élimination de l'eau dans la tomate (**Sharma & Prasad**, 2004). Les diffusivité apparentes varient de 1,7217.10$^{-8}$ à 7,3243.10$^{-8}$ m²/s. Les valeurs trouvées de l'ordre de 10$^{-8}$ m²/s sont nettement plus élevées que des valeurs de diffusivité matière (dans les aliments) comprise entre 10$^{-9}$ et 10$^{-11}$ m²/s **(Zogzas, Maroulis, & Marinos-Kouris**, 1996) et un peu inférieures aux valeurs ajustées par **Al-Harahsheh, Al-Muhtaseb, & Magee**, 2009) qui sont de x10$^{-6}$ pour des puissances comprises entre 3,2 W/g et 16 W/g, lors du séchage microonde de la pulpe de tomate. Cette diffusivité apparente du séchage par microondes est plus élevée que celle obtenue avec l'air convectif qui est de l'ordre de 10$^{-10}$ (**Doymaz**, 2007). Par ailleurs, on note que l'écart de diffusivité apparente entre les puissances est plus important que celui entre les températures d'air, d'où l'influence de la puissance spécifique plus avérée au cours du séchage MOAC.

Analysons à présent la figure 3.30 qui représente la variation du logarithme de la teneur en eau réduite en fonction du temps à différentes puissances spécifiques microondes (3, 5 et 7 W/g) et à la température d'air de 40°C. Les courbes obtenus pour ces puissances spécifiques associées aux températures d'air de 30 et 50°C suivent les mêmes tendances, et sont présentés en annexe VII.

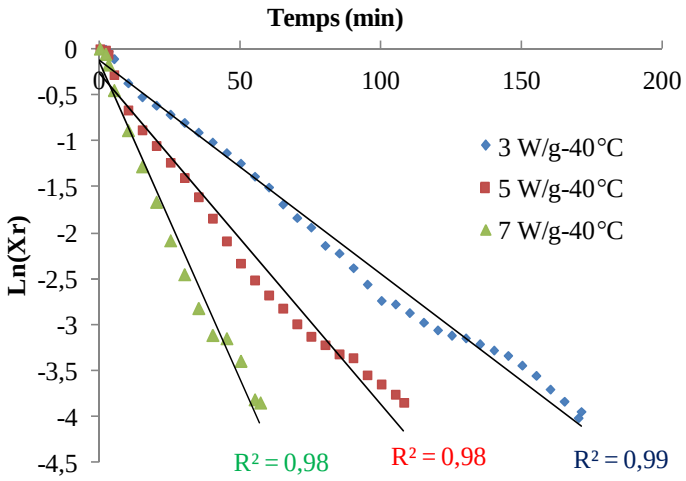



**Figure 3.30-** *Variation de ln(Xr) avec le temps à différentes conditions de séchage MOAC (40°C) de la demi-tomate.*

L'allure des courbes pour les trois niveaux de puissances, montrent une relation globalement linéaire du tracé de la fonction ln(*Xr*). Cela indique que la diffusivité ne varie pas trop avec la teneur en eau du produit (**Sharma & Prasad**, 2004), vu que notre puissance appliquée est régulée en fonction de la masse réelle du produit. Dans certains cas, les études de la diffusivité effective ont montré une non-linéarité du tracé du logarithme de la teneur en eau réduite en fonction du temps. Cette non-linéarité dans la relation pourrait être due à des raisons comme le rétrécissement du produit, la distribution non uniforme de l'humidité initiale, la variation de la diffusivité apparente avec la teneur en eau et de changement de la température du produit pendant le séchage (**Adu & Otten**, 1996; **Khraisheh, Cooper, & Magee**, 1997).

En conclusion, cette étude de la diffusivité effective vient confirmer les résultats obtenus plus haut à savoir que la rapidité du séchage de la tomate est plus liée à la puissance spécifique qu'à la température de l'air.

### III.3.1.1.2- Modèles de représentation

AJUSTEMENT DES COURBES DE SECHAGE

Les résultats du séchage obtenus pour la teneur en eau réduite (*Xr*) ont servi à ajuster les 6 modèles présentés au tableau 2.5 du chapitre matériels et méthodes. Les valeurs des paramètres statistiques sont mentionnées dans les tableaux 3.6, 3.7 et 3.8 ci-dessous. Le meilleur model décrivant le processus de séchage microondes air chaud de la demi-tomate avec pilotage de la puissance spécifique en continu est celui qui a le plus grand $R^2$ et le plus faible $\chi^2$ et REQM. Aux tableaux 3.6, 3.7 et 3.8 on observe que tous modèles étudiés donnent tous un bon

ajustement de la courbe de séchage avec des $R^2$ supérieurs à 0,94, des Racines de l'Erreur Quadratique Moyenne (REQM) et des $\chi^2$ faibles (c'est des valeurs respectivement inférieures à 0,1334 et 6,65 x $10^{-3}$ (**Wang *et al.***, 2007). Les $R^2$ varient entre 0,99979 et 0,98762, 0,99952 et 0,98768 puis 0,99993 et 0,98395 pour respectivement le séchage MOAC (30°C), MOAC (40°C) et MOAC (50°C).

CHOIX DU MODELE APPROPRIE

Bien que tous les modèles ont un bon ajustement avec les données expérimentales, ceux qui s'ajustent le mieux (meilleurs $R^2$, REQM et $\chi^2$ ) dans toutes les conditions de séchage, sont : le modèle "modèle deux termes"($R^2$ variant entre 0,99160 et 0,99910) et celui d'"Henderson & Pabis modifié" ($R^2$ variant entre et 0,99816 et 0,99993). Les valeurs de la REQM varient entre 0,03491 et 0,00935 et entre 0,01399 et 0,00383 pour respectivement les modèles *deux termes* et d'*Henderson et Pabis modifié*. Quant aux valeurs de $\chi^2$ elles varient entre 0,00122 et 0,00009 et entre 0,00020 et 0,00001 pour respectivement les modèles *deux termes* et d'*Henderson et Pabis modifié*. Par conséquent, le meilleur des deux est celui d'*Henderson & Pabis modifié.* Il décrit avec satisfaction le comportement du séchage de la demi-tomate pour toutes les conditions de séchage (tableau 3.6, 3.7 et 3.8). (**Al-Harahsheh, Al-Muhtaseb, & Magee,** 2009) ont rapporté que c'est le modèle de Midilli qui ajuste le mieux les données expérimentales lors le séchage MO (puissance appliquée constante) de la tomate. **Doymaz** (2007) a conclu que c'est le modèle de *Page* qui simule le mieux les données expérimentales, comparé à celui d'*Henderson* et *Pabis* pour le séchage à l'air chaud des tomates.

Ainsi, le modèle d'*Henderson & Pabis modifié* retenu, les constantes du modèle sont rapportées aux tableaux 3.6, 3.7 et 3.8 en fonction des différentes puissances microondes et températures utilisées.

Les coefficients déterminés par la méthode de régression non linéaire nous ont permis de tracer les courbes de simulation de la teneur en eau en fonction du temps (figures 3.31, 3.32 et 3.33).

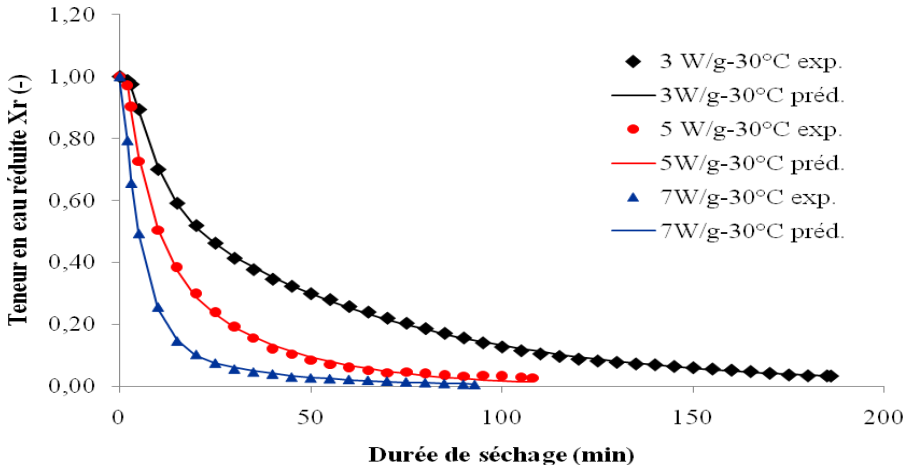



**Figure 3.31-** *Variation des teneurs en eau expérimentale et prédite par le modèle d'Henderson et Pabis modifié aux différentes conditions de séchage MOAC (30°C).*

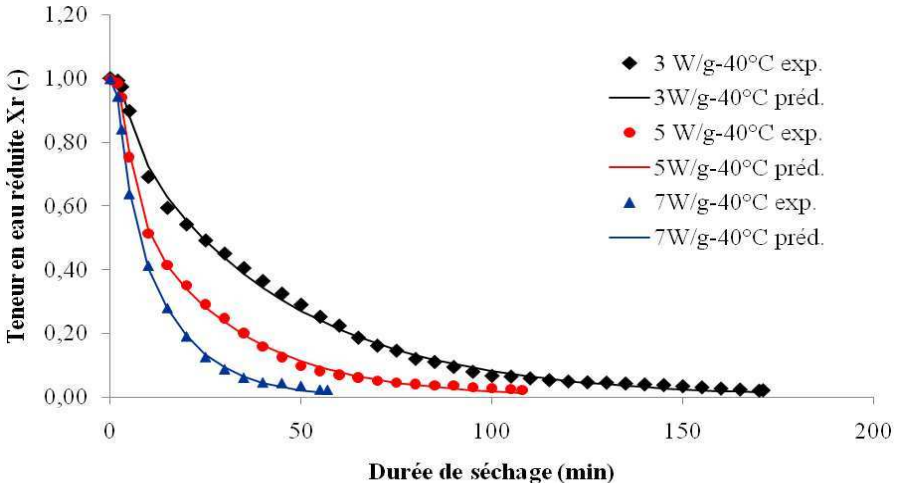



**Figure 3.32-** *Variation des teneurs en eau expérimentale et prédite par le modèle d'Henderson et Pabis modifié aux différentes conditions de séchage MOAC (40°C).*

**Tableau 3.6**- *Résultats statistiques des différents modèles de séchage MOAC (30°C) de la demi-tomate avec pilotage continu de la puissance spécifique (Ps) chaque seconde*.

| N° modèle | Température AC (°C) | Ps MO (W/g) | Constantes des modèles | | | | | | $R^2$ | REQM | $\chi^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 3 | k = 0,05311 | n = 0,79793 | | | | | 0,99121 | 0,04439 | 0,00197 |
| **1** | 30°C | 5 | k = 0,06787 | n = 0,93575 | | | | | 0,98912 | 0,03382 | 0,00110 |
| | | 7 | k = 0,15783 | n = 0,89629 | | | | | 0,99455 | 0,02177 | 0,00047 |
| | | 3 | k = 0,02877 | a = 0,93374 | c = 0,05825 | | | | 0,98762 | 0,03228 | 0,00104 |
| **2** | 30°C | 5 | k = 0,06666 | a =1,00083 | c = 0,03910 | | | | 0,99488 | 0,02373 | 0,00056 |
| | | 7 | k = 0,13895 | a = 0,97893 | c = 0,02419 | | | | 0,99767 | 0,01462 | 0,00023 |
| | | 3 | k = 0,06926 | n = 0,74874 | a = 1,06450 | b = 3,58712E-05 | | | 0,99374 | 0,02327 | 0,00054 |
| **3** | 30°C | 5 | k = 0,07397 | n = 0,94198 | a = 1,04837 | b = 3,55336E-04 | | | 0,99428 | 0,02567 | 0,00066 |
| | | 7 | k = 0,15831 | n = 0,91165 | a = 1,01383 | b = 2,50650E-04 | | | 0,99672 | 0,01781 | 0,00034 |
| | | 3 | k1 = 0,08452 | k2 = 0,01538 | a = 0,43970 | b = 0,61636 | | | **0,99716** | **0,01567** | **0,00025** |
| **4** | 30°C | 5 | k1 = 0,07992 | k2 = 0,01816 | a = 0,87831 | b = 0,17441 | | | **0,99565** | **0,02239** | **0,00050** |
| | | 7 | k1 = 0,15830 | k2 = 0,02481 | a = 0,91538 | b = 0,09929 | | | **0,99910** | **0,00935** | **0,00009** |
| | | 3 | k = 0,06597 | a = 0,41796 | b = 0,22632 | | | | 0,99514 | 0,02022 | 0,00041 |
| **5** | 30°C | 5 | k = 0,06599 | a = 0,92631 | b = 0,13229 | | | | 0,99355 | 0,02662 | 0,00071 |
| | | 7 | k = 0,15294 | a = 0,90996 | b = 0,15182 | | | | 0,99894 | 0,00986 | 0,00010 |
| | | 3 | k1 = 0,34036 | k2= 0,18008 | k3 = 0,01633 | a = -0,60779 | b = 0,92916 | c = 0,67728 | **0,99975** | **0,00483** | **0,00002** |
| **6** | 30°C | 5 | k1 = 2,32432 | k2= 0,03337 | k3 = 0,15218 | a = -0,18783 | b = 0,50169 | c = 0,68613 | **0,99898** | **0,01142** | **0,00013** |
| | | 7 | k1 = 12,3728 | k2= 0,03299 | k3 = 0,18961 | a = -0,08988 | b = 0,15248 | c = 0,93558 | **0,99979** | **0,00481** | **0,00002** |

1- Modèle de Page ; 2- Modèle logarithmique ; 3-Modèle de Midilli ; 4- Modèle deux termes ; 5- Modèle de l'approche diffusionnelle ; 6 –Modèle d'Henderson et Pabis modifié

**Tableau 3.7-** *Résultats statistiques des différents modèles de séchage MOAC (40°C) de la demi-tomate avec pilotage continu de la puissance spécifique (Ps) chaque seconde*

| N° modèle | Température AC (°C) | Ps MO (W/g) | Constantes des modèles | | | | | | $R^2$ | REQM | $\chi^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 3 | k = 0,03473 | n = 0,92831 | | | | | 0,99430 | 0,02322 | 0,00054 |
| **1** | 40°C | 5 | k = 0,06170 | n = 0,92870 | | | | | 0,98768 | 0,03656 | 0,00134 |
| | | 7 | k = 0,06746 | n = 1,07205 | | | | | 0,99245 | 0,03250 | 0,00106 |
| | | 3 | k = 0,02799 | a = 0,98638 | c = 0,01836 | | | | 0,99382 | 0,02450 | 0,00060 |
| **2** | 40°C | 5 | k = 0,05756 | a =0,99961 | c = 0,02016 | | | | 0,99093 | 0,03209 | 0,00103 |
| | | 7 | k = 0,09105 | a = 1,03121 | c = 0,03599 | | | | 0,99442 | 0,02908 | 0,00085 |
| | | 3 | k = 0,04389 | n = 0,87736 | a = 1,03158 | b = -1,07613E-05 | | | 0,99512 | 0,02210 | 0,00049 |
| **3** | 40°C | 5 | k = 0,07219 | n = 0,90470 | a = 1,03904 | b = 2,34801E-04 | | | 0,99117 | 0,03239 | 0,00105 |
| | | 7 | k = 0,07304 | n = 1,08005 | a = 1,05635 | b = 5,56197E-04 | | | 0,99509 | 0,02851 | 0,00081 |
| | | 3 | k1 = 0,12946 | k2 = 0,01538 | a = 0,18282 | b = 0,86428 | | | **0,99597** | **0,02007** | **0,00040** |
| **4** | 40°C | 5 | k1 = 0,09878 | k2 = 0,03417 | a = 0,57895 | b = 0,48429 | | | **0,99298** | **0,02889** | **0,00083** |
| | | 7 | k1 = 0,09058 | k2 = 14,0434 | a =1,08964 | b = -0,08959 | | | **0,99557** | **0,02708** | **0,00073** |
| | | 3 | k = 0,09339 | a = 0,13225 | b = 0,22632 | | | | 0,99480 | 0,02249 | 0,00051 |
| **5** | 40°C | 5 | k = 0,08210 | a = 0,76694 | b = 0,33555 | | | | 0,99029 | 0,03319 | 0,00110 |
| | | 7 | k = 0,08183 | a = 0,99941 | b = 0,73672 | | | | 0,99194 | 0,03496 | 0,00122 |
| | | 3 | k1 = 0,42235 | k2= 0,42598 | k3 = 0,02380 | a =33,70520 | b =-33,59670 | c = 0,89422 | **0,99816** | **0,01399** | **0,00020** |
| **6** | 40°C | 5 | k1 = 0,47301 | k2= 0,39208 | k3 = 0,03632 | a = 3,29860 | b = -2,99793 | c = 0,70086 | **0,99909** | **0,01091** | **0,00012** |
| | | 7 | k1 = 0,55823 | k2= 0,07213 | k3 = 0,74641 | a = 0,82257 | b = 1,88079 | c = -1,70187 | **0,99952** | **0,00990** | **0,00010** |

1-Modèle de Page ; 2- Modèle logarithmique ; 3-Modèle de Midilli ; 4- Modèle deux termes ; 5- Modèle de l'approche diffusionnelle ; 6 –Modèle d'Henderson et Pabis modifié

**Tableau 3.8-** *Résultats statistiques des différents modèles de séchage MOAC (50°C) de la demi-tomate avec pilotage continu de la puissance spécifique (Ps) chaque seconde.*

| N° modèle | Température AC (°C) | Ps MO (W/g) | Constantes des modèles | | | | | | $R^2$ | REQM | $\chi^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 3 | k = 0,04451 | n = 0,91203 | | | | | 0,99291 | 0,02679 | 0,00072 |
| **1** | 50°C | 5 | k = 0,05755 | n = 0,99911 | | | | | 0,98771 | 0,03968 | 0,00157 |
| | | 7 | k = 0,05924 | n = 1,14649 | | | | | 0,98730 | 0,04346 | 0,00189 |
| | | 3 | k = 0,03744 | a = 0,98435 | c = 0,03913 | | | | 0,99432 | 0,02444 | 0,00060 |
| **2** | 50°C | 5 | k = 0,06528 | a =1,02142 | c = 0,02531 | | | | 0,99044 | 0,03607 | 0,00130 |
| | | 7 | k = 0,09956 | a = 1,04980 | c = 0,02753 | | | | 0,99033 | 0,03960 | 0,00157 |
| | | 3 | k = 0,05505 | n = 0,87483 | a = 1,05371 | b = 1,1641E-04 | | | 0,99533 | 0,02258 | 0,00051 |
| **3** | 50°C | 5 | k = 0,07097 | n = 0,95707 | a = 1,05359 | b = 2,07189E-04 | | | 0,99025 | 0,03762 | 0,00142 |
| | | 7 | k = 0,07207 | n = 1,17980 | a = 1,03961 | b = 9,84199E-04 | | | 0,99349 | 0,03410 | 0,01163 |
| | | 3 | k1 = 0,08220 | k2 = 0,02362 | a = 0,40375 | b = 0,65035 | | | **0,99676** | **0,01879** | **0,00035** |
| **4** | 50°C | 5 | k1 = 0,10297 | k2 = 0,04077 | a = 0,53693 | b = 0,52696 | | | **0,99160** | **0,03491** | **0,00122** |
| | | 7 | k1 = 0,10555 | k2 = 0,10155 | a =1,14947 | b =-0,14944 | | | **0,99406** | **0,03257** | **0,00106** |
| | | 3 | k = 0,05449 | a = 0,50701 | b = 0,38899 | | | | 0,99471 | 0,02357 | 0,00056 |
| **5** | 50°C | 5 | k = 0,06724 | a = 0,82163 | b = 0,44921 | | | | 0,98842 | 0,03969 | 0,00158 |
| | | 7 | k = 0,10372 | a = 0,89132 | b = 0,81128 | | | | 0,98395 | 0,05103 | 0,00260 |
| | | 3 | k1 = 0,08007 | k2= 0,02323 | k3 = 0,02323 | a = 0,38080 | b = 0,34614 | c = 0,27681 | **0,99971** | **0,00583** | **0,00003** |
| **6** | 50°C | 5 | k1 = 0,10446 | k2= 0,04139 | k3 = 0,10443 | a = 0,34489 | b = 0,48410 | c = 0,17463 | **0,99875** | **0,01447** | **0,00021** |
| | | 7 | k1 = 3,70880 | k2=0,04502 | k3 = 0,17151 | a =-0,27396 | b = 0,32269 | c = 0,95126 | **0,99993** | **0,00383** | **0,00001** |

1-Modèle de Page ; 2- Modèle logarithmique ; 3-Modèle de Midilli ; 4- Modèle deux termes ; 5- Modèle de l'approche diffusionnelle ; 6 –Modèle d'Henderson et Pabis modifié

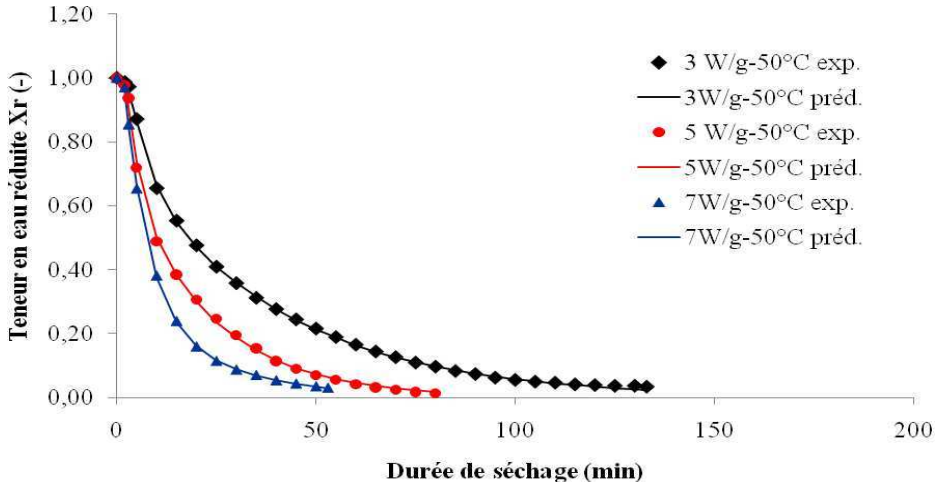



**Figure 3.33-** *Variation des teneurs en eau expérimentale et prédite par le modèle d'Henderson et Pabis modifié aux différentes conditions de séchage MOAC (50°C).*

Nous avons remarqué, au cours des différents tests réalisés, que seul le modèle d'*Henderson et Pabis* modifié arrive à bien simuler la période de mise en température de la courbe de séchage représenté par un léger plateau en début de séchage. Les autres modèles ne le font pas apparaître. On note que l'écart maximal entre les résultats théoriques et les données expérimentales pour le modèle *d'Henderson* et *Pabis modifié* se produit à :

- 3 W/g à la température médiane (40°C) (0,01399 > 0,00583 (50°C) > 0,00483 (30°C)) ;
- 5 W/g à la température maximale (50°C) (0,01447 > 0,01142 (30°C) > 0,01091 (40°C)) ;
- 7 W/g à la température médiane (40°C) (0,00990 > 0,00481 (30°C) > 0,00383 (50°C)) ;

Des régressions linéaires multiples ont été entreprises pour rendre compte de l'effet de la température de séchage et de la puissance microonde sur les constantes et les coefficients du modèle d'Henderson et Pabis modifié. Ainsi le modèle peut être réécrit comme suit :

$Xr = a\exp(-k_1 t) + b\exp(-k_2 t) + c\exp(-k_3 t)$ où les coefficients de séchage $k_1$, $k_2$, et $k_3$ et sont donnés par les relations :

$k_1 = -1{,}948T_a - 0{,}105T_aP_s + 0{,}029T_a^2$ (R = 0,88)

$k_2 = -5{,}668 - 0{,}155P_s + 0{,}328T_a + 0{,}002T_aP_s - 0{,}004T_a^2$ (R = 0,98)

$k_3 = 0{,}128T_a - 0{,}002T_a^2$ (R= 0,77)

et les constantes a, b et c données par les relations :

$a = 10{,}24T_a - 0{,}127T_a^2$ (R= 0,74)

$b = -9{,}676T_a + 0{,}120T_a^2$ (R= 0,72)

$$c = 11{,}722 - 0{,}563 T_a + 6{,}525.10^{-3} T_a^2 \qquad (R = 0{,}53)$$

Les coefficients de séchage $k_1$ et $k_2$ sont liés à $P_s$, $T_a$, et $T_a P_s$ et $T_a^2$ respectivement à 88% et 98% ; quant au coefficient de séchage $k_3$ il est uniquement lié à $T_a$ et $T_a^2$ à 77%. Les constantes du modèle $a$ et $b$ sont aussi liés à $T_a$ et $T_a^2$ à respectivement 74 et 72%. Quant à la constante $c$ sa relation avec les paramètres de séchage (Ta et Ps) est seulement de 53% avec tous les écart-types supérieurs aux valeurs des coefficients de $T_a$ et $P_s$. (mais nous avons retenu les coefficients dont la p-valeur est inférieur à 0,05).

CONCLUSION

Plusieurs études sur le séchage microondes et microondes /air chaud en couche mince ont montré que c'est le modèle de Midilli qui ajuste le mieux les données expérimentales (**McMinn**, 2006 ; **Özbek & Dadali**, 2007 ; **Duygu**, 2011). Aussi une de nos études sur le séchage MOAC sans régulation du gel d'alginate de sodium a montré que le model de Midilli décrit le mieux la cinétique de séchage.

La présente étude montre que la variation de la teneur en eau réduite en fonction du temps à toutes les conditions de séchage MOAC avec régulation de la puissance spécifique, peut être modélisée avec succès par l'équation proposée par Handerson et Pabis, intitulé : "modèle Handerson et Pabis modifié" : $X_r = a.\exp(-k_1 t) + b.\exp(-k_2 t) + c.\exp(-k_3 t)$

Selon notre étude, les diffusivités expérimentales varient entre $1{,}7217 \times 10^{-8}$ et $7{,}3243 \times 10^{-8}$ m²/s pour des conditions de séchage MOAC en régulation continu allant de 3W/g-30°C à 7W/g-50°C.

## III.3.2- OPTIMISATION DU SECHAGE MICROONDES AIR CHAUD DE LA TOMATE PAR LA METHODE CLASSIQUE ET CORICO

### III.3.2.1-OPTIMISATION PAR LA METHODE CLASSIQUE UTILISANT LA METHODE DES SURFACES DE REPONSES

#### III.3.2.1.1- Modèles quadratiques

- COEFFICIENTS DES MODELES

Les résultats du plan d'expériences de Doehlert sont présentés dans les tableaux 3.9-3.10 (réponses liées au procédé et réponses liées à la qualité du produit). Pour l'écriture des modèles, seuls les coefficients significatifs (*) et ceux dont la valeur absolue est supérieure à l'erreur standard (**Morineau & Chatelin**, 2005) ont été retenus.

**Tableau 3.9-** *Valeurs observées des réponses du plan de Doelert liées au procédé de séchage MOAC.*

| Facteurs | | | Réponses procédé | |
|---|---|---|---|---|
| Puissance spécifique (Ps) (W/g) | Durée d'intermittence (DI) (s) | Température de l'air (Ta) (°C) | **Durée de séchage (DS) (min)** | ***$CEM_t$ (MJ/kg eau)** |
| 3 | 151 | 40 | 225 | 180,11 |
| 7 | 151 | 40 | 88 | 79,17 |
| 4 | 101 | 30 | 175 | 74,08 |
| 4 | 300 | 40 | 137 | 167,77 |
| 6 | 101 | 30 | 123 | 49,84 |
| 6 | 200 | 50 | 91 | 116,98 |
| 4 | 1 | 40 | 183 | 155,76 |
| 4 | 200 | 50 | 131 | 163,92 |
| 6 | 1 | 40 | 75 | 73,01 |
| 6 | 300 | 40 | 81 | 121,26 |
| 5 | 250 | 30 | 147 | 81,26 |
| 5 | 151 | 40 | 92 | 94,09 |
| 5 | 51 | 50 | 113 | 167,40 |
| 5 | 151 | 40 | 93 | 83,63 |
| 5 | 151 | 40 | 89 | 94,28 |

*$CEM_t$ : Consommation énergétique massique totale de l'ensemble du système

A l'analyse de ces tableaux, il ressort globalement que les niveaux des facteurs ont été correctement choisis puisque les différentes réponses présentent une grande variabilité en fonction des conditions expérimentales. Autrement dit le domaine expérimental est suffisamment grand pour permettre une recherche d'optimum.

L'utilisation du module de régression linéaire multiple de JMP 9 a permis d'obtenir les coefficients des modèles pour les réponses relatives au procédé et à la qualité de la tomate séchée (tableaux 3.11 et 3.12). Ces coefficients sont donnés pour chaque réponse dans les colonnes intitulées « Coeff » (tableau 3.11 et 3.12). La première valeur de cette colonne donne la moyenne de la réponse et les suivantes correspondent aux effets des facteurs (Ps, DI et Ta) et des interactions croisés (PsDI, PsTa et DITa) et des effets quadratiques ($Ps^2$, $DI^2$ et $Ta^2$).
L'examen de la valeur des coefficients et leurs *p-value* permet de connaître pour une réponse donnée les facteurs et interactions significatifs et les plus influents. Le modèle représentant cette réponse sera alors constitué des coefficients significatifs et de ceux dont la valeur est supérieure à l'erreur standard (ES) (**Morineau & Chatelin**, 2005).

**Tableau 3.10-** *Valeur des réponses du plan de Doehlert liées à la qualité du produit séché par MOAC.*

| Facteurs | | | Réponses qualité | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Puissance spécifique (W/g) | Durée d'intermittence (s) | Température (°C) | **Δa*** | **C*** | **Δh°** | **Ferm**[5] | **Lyc_rés** |
| 3 | 151 | 40 | 2,10 | 47,41 | 4,50 | 3,28 | 52,73 |
| 7 | 151 | 40 | 8,48 | 54,71 | 7,57 | 2,93 | 49,61 |
| 4 | 101 | 30 | 4,77 | 48,36 | 5,91 | 2,66 | 47,53 |
| 4 | 300 | 40 | 7,03 | 47,59 | 8,57 | 3,85 | 45,76 |
| 6 | 101 | 30 | 6,48 | 50,06 | 4,35 | 2,04 | 71,39 |
| 6 | 200 | 50 | 16,77 | 55,21 | -4,36 | 2,25 | 47,63 |
| 4 | 1 | 40 | 4,43 | 47,85 | -0,90 | 4,67 | 87,68 |
| 4 | 200 | 50 | 2,61 | 57,78 | -2,77 | 3,61 | 47,75 |
| 6 | 1 | 40 | 6,08 | 53,63 | -0,30 | 2,26 | 70,03 |
| 6 | 300 | 40 | 11,48 | 53,37 | -8,80 | 2,11 | 60,73 |
| 5 | 250 | 30 | 7,62 | 49,76 | -0,20 | 2,59 | 55,91 |
| 5 | 151 | 40 | 10,98 | 57,70 | -3,61 | 3,27 | 70,77 |
| 5 | 51 | 50 | 3,25 | 41,90 | -3,05 | 2,76 | 81,70 |
| 5 | 151 | 40 | 15,02 | 51,74 | 11,68 | 2,35 | 68,65 |
| 5 | 151 | 40 | 9,64 | 49,88 | 12,44 | 1,92 | 68,03 |

Δa* : paramètre de la couleur rouge ; C* : paramètre de saturation de la couleur ; Δh° : paramètre de teinte de la couleur; Ferm : Fermeté de la tomate; Lyc_Rés= taux de lycopène résiduel

**Tableau 3.11-** *Coefficients des modèles et leur p-value obtenus par analyse de la variance pour les différentes réponses relatives au process microondes*

| Effets | Durée du séchage (DS) (min) | | | CEM (MJ/kg) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *Coeff* | *E.S* | *p-val* | *Coeff* | *E.S* | *p-val* |
| Constante | 91,33 | 7,028 | <0,000* | 90,67 | 7,540 | < 0,001* |
| Ps | -66,25 | 6,087 | <0,000* | -50,29 | 6,530 | 0,001* |
| DI | -8,000 | 5,271 | 0,190 | 10,35 | 5,655 | 0,127 |
| Ta | -18,34 | 4,970 | 0,014* | 40,52 | 5,332 | 0,001* |
| PsDI | 26,00 | 12,17 | 0,086 | 18,12 | 13,06 | 0,224 |
| PsTa | -2,658 | 12,83 | 0,844 | -17,38 | 13,77 | 0,262 |
| DITa | -12,49 | 11,11 | 0,312 | -23,17 | 11,92 | 0,110 |
| $Ps^2$ | 65,17 | 11,11 | 0,002* | 38,97 | 11,92 | 0,022* |
| $DI^2$ | 11,38 | 8,334 | 0,231 | 29,04 | 8,942 | 0,023* |
| $Ta^2$ | 25,27 | 7,028 | 0,016* | 5,291 | 7,540 | 0,514 |

E.S = erreur standard ; coeff. = coefficient des effets du modèle

(*) = effet significatif à un niveau de confiance de 95%

[5] La fermeté est le rapport de la force maximale de perforation de la tomate séchée à celle de la tomate fraiche ($F_{maxTS}/F_{maxTF}$)

## MODELES DES REPONSES RELATIVES AU PROCEDE

Le tableau 3.11 montre que la durée de séchage (DS) est significativement influencée par la puissance spécifique (Ps) et la température de l'air (Ta) ($p < 0,05$). Ainsi, Ps a 99, 99% ($p = 0,0001$) de chance d'influencer la durée de séchage en la faisant varier de 66,25 unités autour d'une moyenne de 91,33; alors que la température a 98,60% ($p = 0,014$) de chance d'influencer la durée de séchage mais seulement de 18,34 unités. On peut donc dire que la puissance spécifique a plus d'influence que la température sur le temps de séchage. Par ailleurs cet effet est négatif dans les deux cas, à savoir qu'une augmentation de l'un de ces facteurs entraîne une diminution de la durée du séchage. Une augmentation de puissance spécifique a en effet pour conséquence une augmentation de la pression interne (liée notamment à une plus grande formation de vapeur d'eau interne) entraînant un plus grand flux d'eau (vapeur + liquide) vers l'extérieur. Quant à l'augmentation de la température de l'air, elle aboutit à une baisse de la pression partielle d'eau de l'air, permettant ainsi d'amplifier le terme moteur du transfert de vapeur d'eau, à savoir l'écart de pression de vapeur d'eau entre la surface du produit et l'air. Ces deux facteurs ont aussi un effet de courbure (effet quadratique ($Ps^2$, $Ta^2$)) significatif sur la durée de séchage ($P < 0,05$). Le modèle pour la réponse durée de séchage (DS) n'est donc pas linéaire par rapport aux facteurs Ps et Ta. Les résultats montrent également que la puissance spécifique (Ps) et la température de l'air (Ta) ont des effets significatifs (*) importants ($P < 0,05$) sur la consommation énergétique massique (CEM). Cet effet est négatif et plus important pour Ps que Ta ; une augmentation de Ps permet donc une diminution de la CEM. En revanche, l'effet de Ta est positif, donc une augmentation de Ta entraîne une augmentation de la CEM. Ce résultat montre que la baisse de la durée de séchage que peut entraîner l'augmentation de Ta, comme vu plus haut, n'est pas suffisant pour compenser l'augmentation de la CEM. En effet, Ta peut faire varier la durée de séchage de seulement 18,34 unités autour d'une moyenne de 91,33, alors qu'elle fait varier la CEM de 40,52 unités autour d'une moyenne presqu'identique de 90,67. On note enfin que la durée d'intermittence (DI) n'a d'effet significatif ni sur la durée du séchage ni sur la consommation énergétique et il en est de même pour les interactions croisées PsDI et PsTa. Toutefois DI a un effet de courbure significatif et positif sur la CEM.

Les coefficients des facteurs retenus (selon les critères définis plus haut), permettent d'écrire l'équation des modèles de la durée de séchage (DS) et de la consommation énergétique massique (CEM) comme suit :

$$DS = 91,33 - 66,25\,Ps - 8,000\,DI - 18,34\,Ta + 26,00\,Ps.DI - 12,49\,DI.Ta + 65,17\,Ps^2 + 11,38\,DI^2 + 25,27\,Ta^2 \quad (3.3)$$

$$CEM = 90,67 - 50,29\,Ps + 10,35\,DI + 40,52\,Ta + 18,12\,Ps.DI - 17,38\,Ps.Ta - 23,17\,DI.Ta + 38,97\,Ps^2 + 29,04\,DI^2 \quad (3.4)$$

Ces équations permettent de prédire la valeur de la durée de séchage et de la consommation énergétique massique à obtenir au cours du séchage MOAC pour n'importe quelle combinaison de facteur.

- MODELES DES REPONSES RELATIVES A LA QUALITE DE LA TOMATE SECHEE

Le tableau 3.12 montre que seules les réponses relatives à la variation de la couleur rouge (Δa*) et à la teneur résiduelle en lycopène (Lyc_rés) sont influencés par les facteurs du plan d'expériences. En effet le paramètre Δa est uniquement influencé positivement par Ps et négativement par l'effet quadratique de celui-ci $Ps^2$. Quant au taux résiduel en lycopène, il est influencé négativement par la durée d'intermittence (DI) ; ce qui est prévisible puisque qu'une augmentation de DI a pour conséquence une augmentation plus importante de Ps entre deux pesées, donc avant adaptation, et par conséquent, un impact plus important sur la qualité de la tomate en cours de séchage. Cependant l'effet de courbure n'est observé que sur Ps ($Ps^2$). On note également un effet de synergie positif entre les facteurs Ps et DI et un effet de synergie négatif entre les facteurs Ps et Ta. Cela signifie que les actions conjointes de la puissance et de la durée d'intermittence ou de la puissance et de la température ont un effet respectivement positif et négatif sur le taux résiduel de lycopène. L'action négative de cette dernière synergie sur le taux résiduel en lycopène a déjà été signalé par (**Heredia *et al.*,** 2010). On obtient après avoir retenu les coefficients significatifs et ceux dont la valeur absolue est supérieure à l'erreur standard, les modèles des réponses ci-dessous.

**Tableau 3.12-** *Analyse de la variance et coefficients pour la prédiction des modèles relatifs aux paramètres qualité*

| Effets | Δa* | | | C* | | | Δh° | | | Fermeté | | | Lycopène résiduel | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *Coeff* | *E.S* | *p-val* | *Coeff* | *E.S* | *p-val* | *Coeff* | *E.S* | *p-val* | *Coeff* | *E.S* | *p-val* | *Coeff* | *E.S* | *p-val* |
| Constante | 11,88 | 1,590 | <0,001* | 53,11 | 2,744 | <0,001* | 6,837 | 3,998 | 0,148 | 2,517 | 0,489 | 0,004* | 69,15 | 3,403 | <0,001* |
| Ps | 4,343 | 1,377 | 0,025* | 3,160 | 2,376 | 0,241 | -1,725 | 3,462 | 0,639 | -0,854 | 0,424 | 0,100 | 1,852 | 2,947 | 0,557 |
| DI | 2,555 | 1,192 | 0,085 | 1,795 | 2,058 | 0,423 | -0,549 | 2,998 | 0,862 | -0,132 | 0,367 | 0,734 | -14,299 | 2,552 | 0,003* |
| Ta | 0,627 | 1,124 | 0,601 | 1,117 | 1,940 | 0,590 | -3,373 | 2,827 | 0,286 | 0,222 | 0,346 | 0,549 | 0,369 | 2,406 | 0,884 |
| PsDI | 1,396 | 2,753 | 0,634 | -0,001 | 4,752 | 0,999 | -8,985 | 6,925 | 0,251 | 0,333 | 0,847 | 0,710 | 16,311 | 5,894 | 0,039* |
| PsTa | 5,764 | 2,902 | 0,104 | -2,133 | 5,009 | 0,688 | 2,976 | 7,299 | 0,700 | -0,480 | 0,893 | 0,614 | -17,424 | 6,212 | 0,038* |
| DITa | 2,875 | 2,514 | 0,305 | 6,871 | 4,339 | 0,174 | 0,272 | 6,322 | 0,967 | -0,001 | 0,773 | 0,999 | -10,274 | 5,381 | 0,114 |
| Ps² | -6,590 | 2,513 | 0,047* | -2,052 | 4,338 | 0,656 | -0,801 | 6,321 | 0,904 | 0,589 | 0,773 | 0,481 | -17,981 | 5,381 | 0,021* |
| DI² | -2,978 | 1,885 | 0,175 | -1,988 | 3,254 | 0,568 | -6,997 | 4,741 | 0,200 | 0,558 | 0,580 | 0,380 | 1,393 | 4,035 | 0,744 |
| Ta² | -3,201 | 1,590 | 0,100 | -1,811 | 2,744 | 0,538 | -5,170 | 3,998 | 0,252 | -0,088 | 0,489 | 0,864 | -7,818 | 3,403 | 0,070 |

ES = Erreur standard ; *Les valeurs s de $p < 0,05$ sont significatifs à $\alpha = 0,05$.

Le tableau 3.d des coefficients des modèles relatifs à la qualité des tomates séchées permet d'écrire les équations comme suit :

$$\Delta a^* = 11,88 + 4,343Ps + 2,555DI + 5,764Ps.Ta + 2,875DI.Ta - 6,590Ps^2 - 2,978DI^2 - 3,201Ta^2 \quad (3.5)$$

$$C^* = 53,11 + 3,160\,Ps + 6,871\,DI.Ta \quad (3.6)$$

$$\Delta h^\circ = 6,837 - 3,373Ta - 8,985Ps.DI - 6,997DI^2 - 5,170Ta^2 \quad (3.7)$$

$$Ferm = 2,517 - 0,854Ps \quad (3.8)$$

$$Lyc_Rés = 69,15 - 14,30DI + 16,31PsDI - 17,42Ps.Ta - 10,27DI.Ta - 17,98Ps^2 - 7,818Ta^2 \quad (3.9)$$

### III.3.2.1.2- Validité des modèles

REPONSES RELATIVES AU PROCEDE

Pour vérifier la validité de chaque modèle du second degré obtenu, on compare les réponses mesurées et les réponses calculées. La figure 3.34 met en évidence ces deux valeurs.

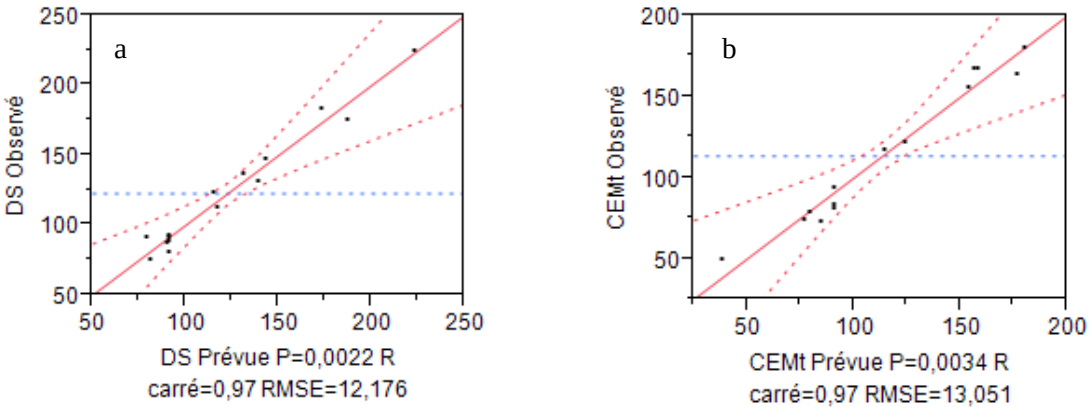
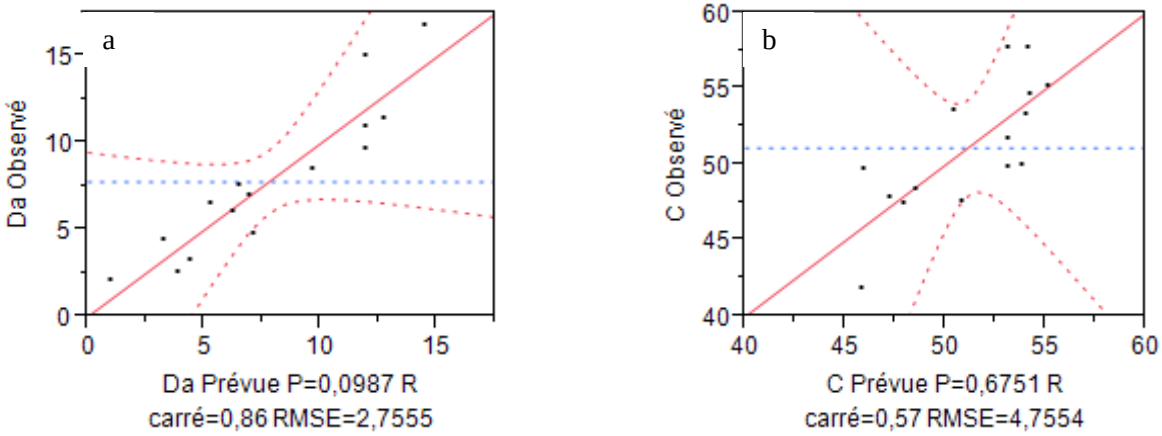



**Figure 3.34-** *Comparaison des réponses calculées et mesurées pour les réponses : a : durée de séchage (DS); b : consommation énergétique massique totale (CEM).*

On peut constater d'après ces figures que les modèles obtenus pour les deux réponses relatives au procédé, DS et CEM, sont très bon puisque leur coefficient de détermination $R^2$ est de 0,97 (supérieur à 0,90 ; (**Goupy**, 2005). On note ainsi que les points expérimentaux ne s'éloignent pas trop de la première bissectrice ; cela indique que ces modèles rendent assez bien compte des valeurs expérimentales.

REPONSES RELATIVE A LA QUALITE

La comparaison entre valeurs calculées et expérimentales pour les réponses relatives à la qualité du produit est présentée dans la figure 3.35.



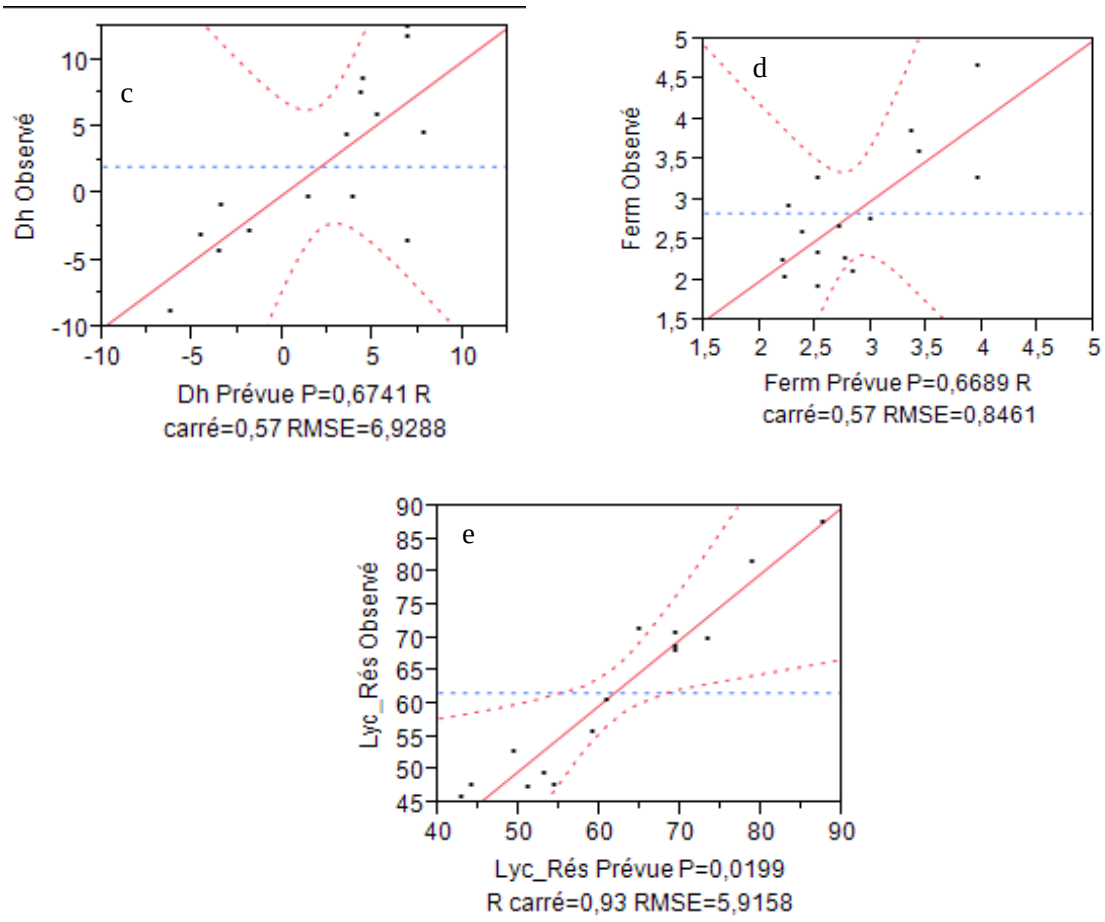



**Figure 3.35-** *Comparaison des réponses calculées et mesurées pour les réponses : a - paramètre variation de la couleur rouge (Δa*=Da); b - paramètre de saturation de la couleur (C*) ; c - paramètre de variation de la teinte (Δh°=Dh) ; d- fermeté (Ferm) ; e – taux résiduel en lycopène (Lyc_Rés)*

Pour les réponses relatives à la qualité, seuls les modèles pour le taux résiduel de lycopène et la variation du paramètre de la couleur rouge (Δa*) de la tomate sont bons avec des $R^2$ respectifs de 0,93 et 0,86. Leurs points expérimentaux sont également assez bien répartis autour de la première bissectrice. Cependant les autres réponses que sont la saturation de la couleur (C*), la variation de la teinte (Δh°), la fermeté (Ferm), liés à 57% à leurs modèles et l'humidité finale du produit (Hf) lié à 78 % ont des modèles moins satisfaisants. Ces derniers modèles n'ont été retenus que pour tracer les surfaces de réponses.

### III.3.2.1.3- Qualité des modèles

La qualité des modèles est vérifiée en comparant l'écart-type de l'erreur expérimentale à celui des résidus du modèle. L'analyse de la variance (ANOVA) des modèles des différentes réponses relatives au process en fonction de la puissance spécifique (Ps), de la température de l'air de séchage (Ta) et de la durée d'intermittence avant adaptation de la puissance à la masse (DI) est

présenté dans les tableaux 3.13 et 3.14 ci-dessous. Ces tableaux représentent respectivement l'ANOVA des réponses DS et CEM.

**Tableau 3.13**- *L'analyse de la variance (ANOVA) pour le modèle quadratique développé pour la durée de séchage DS après le séchage MOAC de la tomate.*

| **Source** | SCE | DDL | CM | Rapport F | Prob>F |
|---|---|---|---|---|---|
| **Modèle** | 26236,5 | 9 | 2915,2 | **19,66** | 0,0022* |
| **Résidus** | 741,3 | 5 | 148,3 | | |
| **Défaut d'ajustement** | **732,6** | 3 | 244,2 | 56,35 | **0,0175*** |
| **Erreur pure** | **8,7** | 2 | 4,3 | | |
| **Total** | 26977,7 | 14 | | | |

SCE= Somme des carrés des écarts ; DDL= Degré de liberté ; CM= Carré moyen
SCE Résidus=SCE Défaut d'ajustement+SCE Erreur pure
(*) Prob>F < 0,05 est significatif à $\alpha$= 0,05.

L'analyse de la variance du tableau 3.13, indique que le modèle de DS prend en charge la plus grande partie de l'explication des réponses mesurées, avec un rapport F des carrés moyen de 19,66 (confirmant la validité du modèle). Par contre, le tableau montre que le défaut d'ajustement est significativement plus élevé que l'erreur expérimentale (ou erreur pure) (comparaison des deux SCE). Cela est confirmé par la *P-value* (ou Prob>F) =0,0175* < 0,05, donc le test d'ajustement significatif (**Goupy**, 2005). Il faut noter que : lorsque le test du "défaut d'ajustement" est non significatif le modèle est jugé bon (**Amouzgar *et al.,*** 2010 ; **Govarerts & Leboulengé** , 2000). Dans notre cas c'est le contraire ; toutefois ce modèle a été retenu pour la suite du travail et surtout pour tracer les surfaces de réponses comme l'on aussi rapporté (**Morineau & Chatelin**, 2005).

**Tableau 3.14-** *L'analyse de la variance (ANOVA) pour le modèle quadratique développé pour la consommation énergétique massique CEM après le séchage MOAC de la tomate.*

| Source | SCE | DDL | CM | Rapport F | Prob>F |
|---|---|---|---|---|---|
| Modèle | 24938,4 | 9 | 2770,9 | 16,27 | 0,0034* |
| Résidus | 851,7 | 5 | 170,3 | | |
| Défaut d'ajustement | 777,4 | 3 | 259,1 | 6,98 | 0,1279 |
| Erreur pure | 74,3 | 2 | 37,1 | | |
| Total | 25790,1 | | | | |

SCE= Somme des carrés des écarts ; DDL= Degré de liberté ; CM= Carré moyen
SCE Résidus=SCE Défaut d'ajustement+SCE Erreur pure
(*) Prob>F < 0,05 est significatif à $\alpha$= 0,05

Dans le tableau 3.14, l'analyse de la variance, donne un rapport F de 16,27 qui est suffisant pour valider le modèle. Dans la rubrique "défaut d'ajustement", le rapport F mesure la probabilité que la variance expliquée par le défaut d'ajustement ne soit pas différente de la variance de l'erreur expérimentale (erreur pure). Une forte probabilité indique donc que le défaut d'ajustement n'est pas statistiquement différent de l'erreur expérimentale. C'est le cas ici avec Prob>F (= 0,1279) > 0,05. Le modèle de CEM, est donc de bonne qualité.

Le tableau 3.15 présente une synthèse des tableaux ANOVA et défaut d'justement des réponses liées à la qualité. Les résultats détaillés sont présentés à l'annexe VIII.

**Tableau 3.15-** *L'analyse de la variance (ANOVA) pour les modèles quadratiques développés pour les réponses relatives à la qualité de la tomate séchée par MOAC.*

| Réponses des paramètres qualité | Source | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Modèle | | Défaut d'ajustement | |
| | Rapport F | Prob.>F | Rapport F | Prob.>F |
| **Δa*** | 3,34 | 0,10 | 0,94 | 0,55 |
| **C*** | 0,74 | 0,68 | 1,59 | 0,41 |
| **Δh°** | 0,74 | 0,67 | 0,31 | 0,82 |
| **Fermeté (Ferm)** | 0,75 | 0,67 | 1,84 | 0,37 |
| **Lycopène résiduel (Lyc_rés)** | 7,44 | 0,02* | 27,57 | 0,04* |

Au tableau 3.15, on observe que seul le taux résiduel de lycopène (Lyc_rés) a un défaut d'ajustement significatif (*), ce qui signifie que le modèle n'est pas bon, cependant il est valide car le $R^2$= 0,93 (ou que le rapport F du modèle est significatif (*)). Les autres modèles des réponses relatives à la qualité ont des tests de manque d'ajustement non significatifs qui signifient qu'ils sont bons. Cependant ces modèles ont des rapports de F très petit (sauf celui de l'humidité finale). Cela signifie que ces modèles ne prennent en chargent qu'une petite partie de l'explication des réponses mesurées. Cependant la réponse Δa* a une valeur de $R^2$ acceptable de 0,85

En définitive, nous avons retenu les 4 modèles (DS, CEM, $\Delta a^*$, Lyc_Rés) pour l'optimisation du procédé de séchage MOAC par la méthode des surfaces de réponses. Les autres modèles ($C^*$, Δh°, Ferm) n'étant pas valides ont été affectés d'un poids nul au cours l'optimisation. Néanmoins ils ont été adoptés pour le tracé des surfaces de réponses comme l'ont déjà fait **Morineau & Chatelin** (2005).

### III.3.2.1.4- Désirabilité et poids des différentes réponses

Une optimisation correspond à la recherche du meilleur compromis possible entre différents souhaits ou désirs : la minimisation et/ou la maximisation de certaines réponses. Afin d'orienter cette recherche on peut attribuer des poids différents aux différentes réponses en fonction de l'importance que nous leur accordons. Ainsi, un industriel peut vouloir privilégier suivant le cas la minimisation de la consommation énergétique ou au contraire la qualité du produit séché. .
Concernant les réponses relatives au procédé, nous avons accordé un poids plus important à la réponse consommation énergétique (CEM) par rapport aux autres. Pour ce qui est de la durée du séchage, un faible poids lui a aussi été affecté à cause de la durée d'intermittence de la régulation qui pourrait influencer la durée de séchage que nous ne voulions pas influencer. Au niveau des réponses relatives à la qualité, l'accent a été mis sur la qualité nutritionnelle de la tomate en lui affectant également un poids élevé. Quant au paramètre couleur rouge, un faible poids lui a été affecté, car les facteurs étudiés plus haut l'influence faiblement. Les différents poids affectés aux différentes réponses sont présentés dans le tableau 3.16 suivant.

**Tableau 3.16-** *Désirabilité et poids affecté aux différentes réponses*

| Réponses | Poids | Désirabilité |
|---|---|---|
| Δa* | 1 | Minimiser |
| C* | 0 | - |
| Δh° | 0 | - |
| Ferm | 0 | - |
| Lyc_rés (%) | 5 | Maximiser |
| DS (min) | 1 | Minimiser |
| CEM (MJ/kg) | 3 | Minimiser |
| Total | 10 | |

La désirabilité globale lors de la recherche de l'optimum correspond à la synthèse des différentes désirabilités ou vœux de minimisation et de maximisation sur les différentes réponses. Les poids de $C^*$, Δh° et Ferm étant nuls, aucune désirabilité n'a été appliquée. La coloration rouge de la tomate séchée doit être le plus proche possible de celle de la tomate fraîche, nous avons donc cherché à minimiser Δa*. Le seul élément chimique quantifié dans cette étude c'est-à-dire le lycopène résiduel a été maximisé. Toutes les réponses liées au procédé (DS, CEM,) ont été minimisées car essentiellement liées à la consommation énergétique à réduire.

### III.3.2.1.5- Etude de l'influence des effets et des interactions sur les réponses

Il s'agit ici de trouver un compromis qui permet de maximiser, minimiser et ou atteindre l'objectif des modèles des huit réponses issues du séchage MOAC. Après donc avoir rentré les différentes désirabilités

Nous allons d'abord étudier les différentes relations entre les facteurs et les différentes réponses en examinant la série des figures en 3D des surfaces de réponses générées en fonction de deux facteurs, après avoir fixé le troisième.

REPONSES RELATIVES AU PROCEDE

- ***Durée de séchage (DS)***

A l'analyse des coefficients de chaque facteur (puissance spécifique microondes (Ps), durée d'intermittence (DI) et température de l'air (Ta)) dans le modèle, on note que le facteur le moins influent des trois sur DS est DI qui est non significative avec une p-value supérieure à 0,05. De ce fait, la figure 3.36 montre la surface de réponse en 3D indiquant l'effet de l'interaction entre la puissance spécifique microondes et la température (variant respectivement de 3 à 7 W/g et de 30 à 50°C) sur la durée de séchage de la demi tomate, pour le facteur DI positionné à son niveau 0 (151 s). On peut noter qu'en augmentant la puissance microondes, DS diminue, et ceci même à faible température. Ce phénomène observé est la principale raison de l'utilisation des microondes dans le séchage des produits alimentaires. D'une façon générale, en augmentant la température de l'air, la durée de séchage baisse d'avantage et atteint un minimum pour une température d'air d'environ 43,5°C et une puissance spécifique microondes autour de 5,5 W/g.

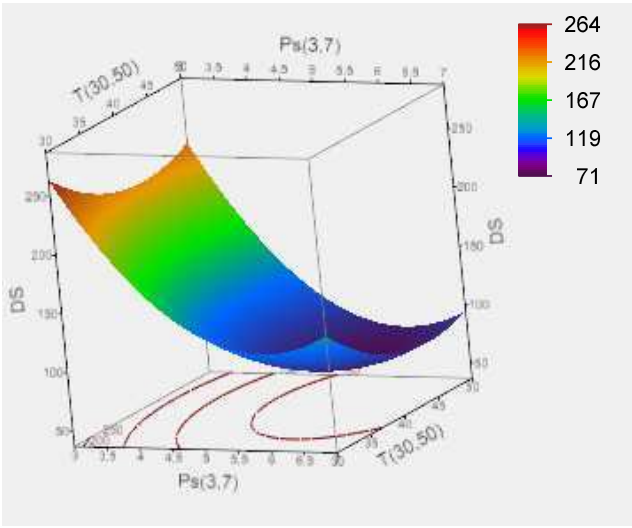



**Figure 3.36-** *Surface de réponse 3D illustrant l'effet de l'interaction entre la puissance spécifique et la température de l'air sur la durée de séchage MOAC de la demi-tomate.*

- ***Consommation énergétique massique (CEM)***

Concernant la CEM, la puissance spécifique microondes et la température ont encore plus d'influence par rapport à la durée d'intermittence. La surface de réponses représentée à la figure 3.37, met en évidence l'influence de Ps et de Ta sur la CEM.

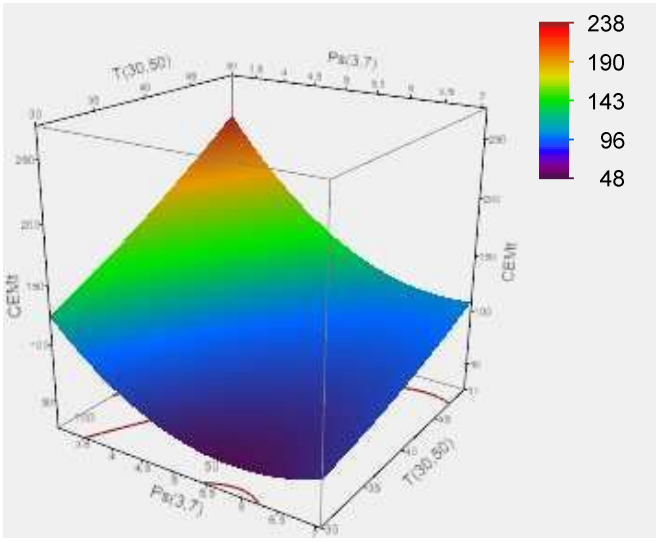



**Figure 3.37-** *Surface de réponse 3D illustrant l'effet de l'interaction entre la puissance spécifique et la température de l'air sur la CEM du séchage MOAC de la demi-tomate.*

Le tracé de la surface de réponses montre que la CEM est maximale lorsque Ps est faible (minimale) et Ta élevée (maximale) ; cela est due à un rallongement de la durée de séchage. Ensuite la CEM diminue avec l'augmentation de Ps quelque soit Ta mais d'avantage avec la diminution de Ta. Le minimum de la CEM est obtenu à 5, 5 W/g à pour une température de 30°C.

- REPONSES RELATIVES A LA QUALITE DU PRODUIT

- ***Paramètre de couleur rouge de la tomate (Δa*)***

Les coefficients du modèle de l'écart Δa* montre qu'il est plus influencé par la puissance spécifique MO et la durée d'intermittence que par la température. C'est pourquoi nous fixons la température à son niveau 0 (40°C). Le tracé de la surface de réponse (figure 3.38) représente donc l'évolution de Δa* en fonction de Ps et de DI.

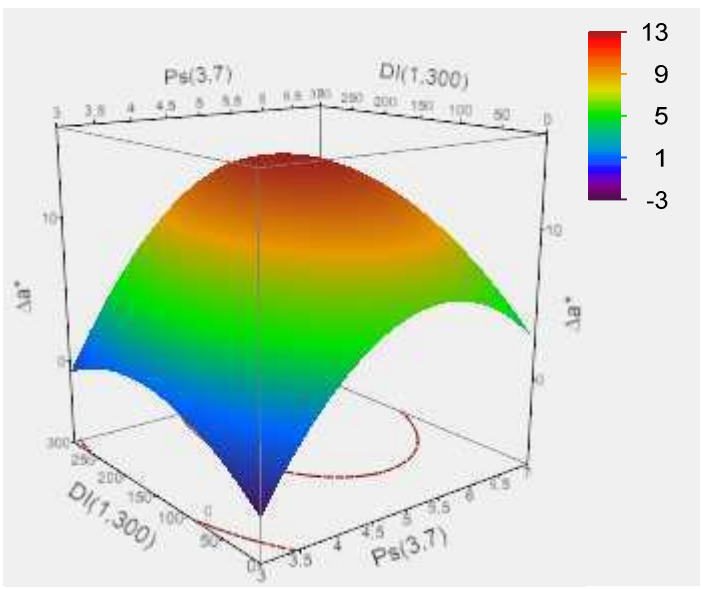



**Figure 3.38-** *Surface de réponse 3D illustrant l'effet de l'interaction entre la puissance spécifique et la durée d'intermittence sur le paramètre couleur rouge Δa* de de la demi-tomate séchée par MOAC.*

Ici l'objectif est de minimiser Δa*, afin d'avoir une tomate séchée proche de la tomate fraîche. Pour cela, il faut diminuer Ps et DI pour être au plus proche de la valeur 0. Ceci s'explique par le fait qu'une durée d'intermittence longue entraîne plus de dégradation du lycopène qui est responsable de la couleur rouge de la tomate. Ce résultat a déjà été observé précédemment lors de l'étude comparative du séchage MOAC avec régulation continue de la puissance spécifique et par intermittence qui a montré un effet négatif de l'intermittence sur le taux résiduel de lycopène. En effet, on obtient un maximum de déviation de la couleur rouge entre la tomate fraîche et séchée, lorsque Ps est de 5,3 W/g et DI de 226 secondes. Par contre, un minimum stable pour Δa* est obtenu à 3,1 W/g pour une DI de 175 secondes.

- ***Paramètre de saturation de la tomate (C*)***

Le paramètre C* de saturation de la couleur de la tomate est influencé par Ps et DI. Le tracé de la surface de réponse (figure 3.39) représente donc l'évolution de C* en fonction de Ps et de DI.

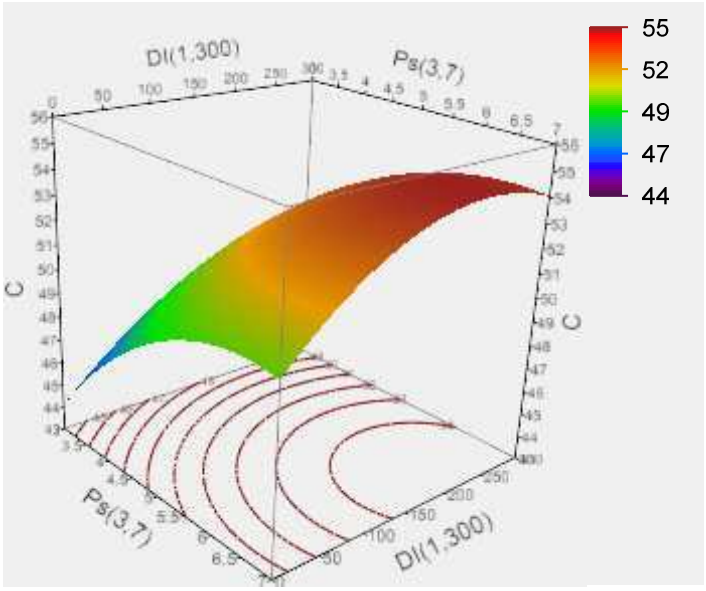



**Figure 3.39-** *Surface de réponse 3D illustrant l'effet de l'interaction entre la puissance spécifique et la durée d'intermittence sur le paramètre de saturation de la couleur C* de la demi-tomate séchée par MOAC.*

Notre objectif ici, est de maximiser la saturation de la couleur afin de permettre une plus forte concentration de la couleur rouge de la tomate. La figure 3.39 révèle que l'augmentation de Ps avec un niveau bas de DI, conduit à la croissance de la saturation C* de la couleur de la tomate. Lorsque Ps et DI augmentent simultanément on observe une plus grande augmentation de la saturation. Cela pourrait être dû au fait que l'action synergique des deux facteurs entraînerait le maintient de plus de pulpe au niveau de la tomate séchée, favorable à la concentration des pigments.

- ***Paramètre de la variation de la couleur de teinte (Δh°)***

Cette réponse est influencée par Ps et Ta et est représenté à la figure 3.40 en fonction de ces deux facteurs, à DI constante fixé à son niveau 0 (151s). Il ressort de la figure 3.40 que l'écart de l'angle de teinte (Δh°) de la tomate est élevé lorsque la température de l'air et la puissance spécifique sont basses. Cela peut s'expliquer par la durée du séchage trop longue qui provoque la dégradation de la teinte du produit. Sa valeur diminue lorsque Ta ou que Ps augmente. C'est donc l'effet contraire observé avec des traitements thermiques plus agressifs. On note aussi que l'augmentation simultanée de Ta et de Ps n'affecte pas trop la variation de l'angle de teinte. Cela pourrait être dû à la réduction du temps de séchage, favorable à la non dégradation de la couleur et donc à l'angle de teinte. L'objectif étant de minimiser cette variation de la couleur de teinte, l'on pourrait choisir cette option ; ce qui ferait également économiser l'énergie.

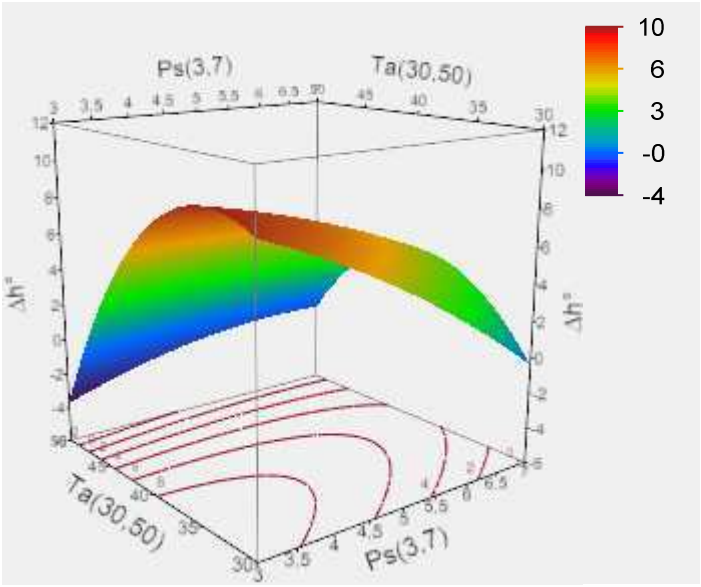



**Figure 3.40-** *Surface de réponse 3D illustrant l'effet de l'interaction entre la puissance spécifique et la température de l'air sur l'écart de teinte Δh° de la demi-tomate séchée par MOAC.*

- ***Paramètre de fermeté de la tomate séchée (Ferm)***

Le paramètre de fermeté qui correspond au rapport de la force maximale de pénétration de la tomate séchée sur celle de la tomate fraiche est influencé essentiellement par Ps et Ta. La figure 3.41, illustre bien ces influences. L'objectif ici est de minimiser cette réponse pour obtenir une tomate séchée seulement 2 fois plus ferme que la tomate fraîche. On note que pour Ps faible et Ta élevée, la fermeté de la tomate augmente. Cela pourrait s'expliquer par le fait que Ps étant faible, on a moins de dégradation de la structure (selon notre étude sur la structure de la tomate séchée), par ailleurs la température étant élevée (50°C) le phénomène de croûtage habituel dans le cas d'un séchage classique mais amoindri dans le cas d'un séchage micro-onde est favorisé. Pour obtenir une fermeté plus basse, il faut augmenter Ps en diminuant ou augmentant Ta.

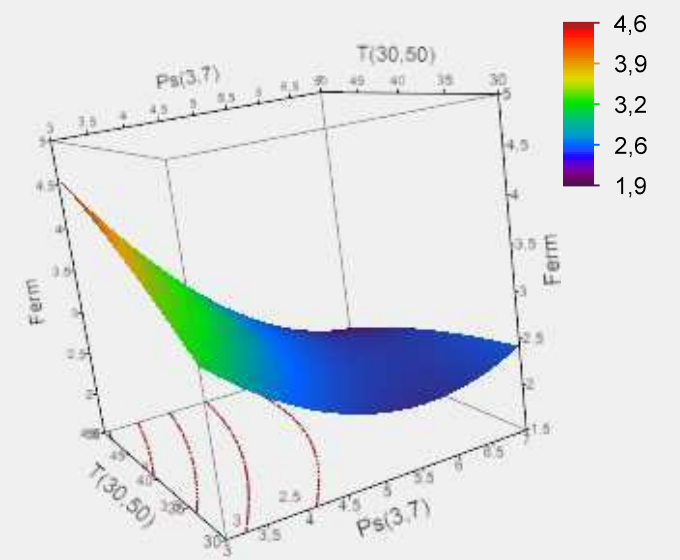



**Figure 3.41-** *Surface de réponse 3D illustrant l'effet de l'interaction entre la puissance spécifique et la durée d'intermittence sur la fermeté de la demi-tomate séchée par MOAC.*

- ***Taux résiduel de lycopène (Lyc_Rés.)***

Le taux résiduel de lycopène qui correspond au rapport de la teneur en lycopène résiduelle sur la teneur en lycopène initiale base sèche, est influencé par Ps et DI. La figure 3.42, montre que le taux de lycopène augmente avec la diminution de la puissance spécifique et celle de la durée d'intermittence. Le maximum de taux résiduel de lycopène recherché est atteint lorsque Ps est moyenne (autour de 5 W/g) et DI faible. Effectivement notre étude a montré que DI fort et/ou une Ps trop élevé dégradent la qualité nutritive du produit.

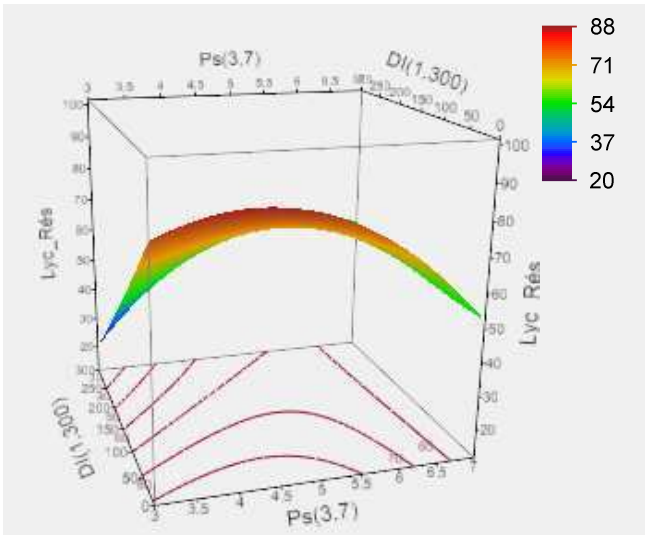



**Figure 3.42-** *Surface de réponse 3D illustrant l'effet de l'interaction entre la puissance spécifique et la durée d'intermittence sur le taux résiduel de lycopène de la demi-tomate séchée par MOAC.*

### III.3.2.1.6- Détermination des conditions optimales du séchage MOAC pour la qualité de la tomate

Nous avons procédé à une optimisation multi objectif permettant de trouver un réglage optimal pour les trois facteurs (Ps, DI et Ta) aboutissant au meilleur compromis possible en termes de qualité de la tomate séchée et de consommation énergétique. Ce point optimal trouvé à l'aide du programme d'optimisation numérique du logiciel JMP 9 est présenté dans le tableau 3.17.

**Tableau 3.17-** *Conditions optimales pour le séchage MOAC de la tomate***.**

| N° | Facteurs | | | Désirabilité composite |
|---|---|---|---|---|
| | Ps (W/g) | DI (sec.) | Ta (°C) | |
| 1 | 5,18 | 70,5 | 37,7 | 0,950 |
| 2 | **5,18** | **64,4** | **37,1** | **0,962** |
| 3 | 5,22 | 67,4 | 37,5 | 0,959 |
| 4 | 5,10 | 85,6 | 39,3 | 0,911 |
| 5 | 5,06 | 85,6 | 39,1 | 0,909 |
| 6 | 5,00 | 91,6 | 40,0 | 0,886 |
| 7 | 5,18 | 64,4 | 37,1 | 0,957 |
| 8 | 5,02 | 82,6 | 38, 5 | 0,921 |

La recherche de l'optimum s'est faite en utilisant la méthode des fonctions de désirabilité **(Erbay & Icier**, 2009). L'application de cette méthode a permis de déterminer les 8 conditions présentées dans le tableau 3.17. Ainsi, on déduit que la plus grande désirabilité composite (0,962) est obtenue pour une puissance spécifique de 5,18 W/g, une durée d'intermittence de 64 secondes et une température de l'air de 37 °C. L'optimum n°2 (tableau 3.17) ayant la plus forte désirabilité, a été donc retenu.

VALIDATION DES MODELES

Les conditions optimales retenues ont été utilisées pour tester l'adéquation des modèles aux données expérimentales. Trois essais de validation dans les conditions prévues par le point optimal ont donc été réalisés. A partir des résultats donnés dans un tableau en annexe IX, nous avons établie la figure 3.43 qui confrontent les valeurs des réponses expérimentales à celles des réponses calculées par les différents modèles.

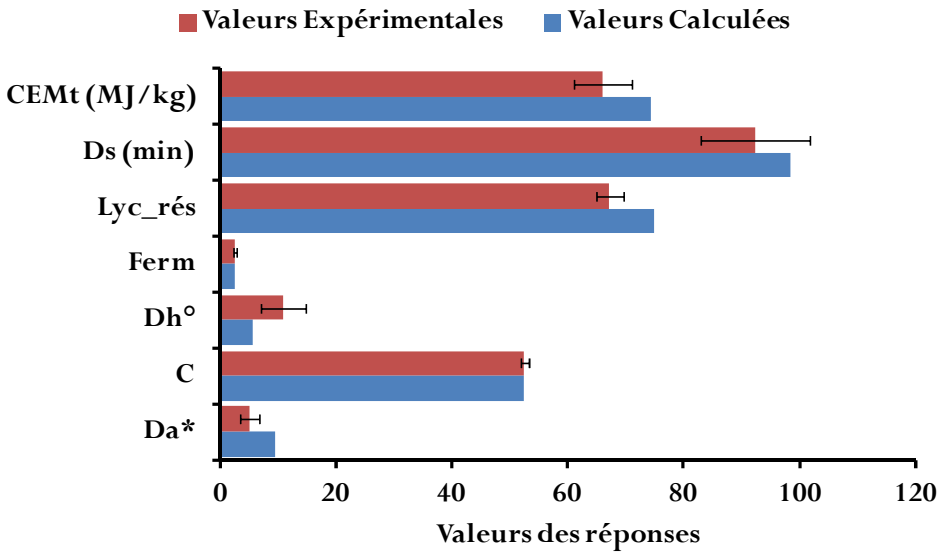



**Figure 3.43-** *Confrontation entre réponses mesurées et réponses prédites des différents modèles (obtenus par la méthode classique des surfaces de réponses RSM) pour les conditions optimales de séchage MOAC*

La figure 3.43 montre bien que les valeurs des réponses prédites par les différents modèles et celles obtenues par les expériences de validation sont très proches. Et cette figure nous révèle que les réponses issues des modèles expliquent à 99,05 % celles issues des expériences.

## Conclusion de l'étude

Au cours de cette étude d'optimisation, nous avons fait varier simultanément trois facteurs (puissance spécifique des microondes (*Ps)*, température de l'air (Ta) et durée d'intermittence du pilotage de Ps (DI)) pouvant influencer le séchage MOAC, en utilisant la méthode des surfaces de réponses. Un modèle mathématique a été proposé pour chacune des sept réponses étudiées. Pour les réponses relatives au procédé (CEM et DS) les données ajustent très bien les modèles avec un même coefficient de détermination ($R^2$) de 0,97. Pour les réponses relatives à la qualité de la tomate séchée ($\Delta a^*$, $C^*$, $\Delta h°$, Ferm, Lyc_Rés.), seuls les données du taux résiduel en lycopène (Lyc_Rés) et de la variation de la couleur rouge de la tomate ($\Delta a^*$) ajustent mieux les modèles. Ce qui n'est pas étonnant car la couleur rouge est caractéristique de la présence en lycopène. Le meilleur compromis obtenu, suite à une optimisation multifonction, indique qu'il faut appliquer une puissance spécifique de 5,2 W/g, une température d'air de 37°C et une durée d'intermittence de 1 min. 4 sec. pour avoir une tomate séchée, à 22% ± 3 d'humidité finale, de qualité organoleptique et nutritionnelle acceptable avec une consommation d'énergie réduite au cours du procédé de séchage MOAC.

### III.3.2.2-OPTIMISATION PAR LA METHODE CORICO

#### III.3.2.2.1- Modèles CORICO

La méthodologie CORICO a aussi été adoptée pour générer des modèles de régression en fonction des paramètres de processus (puissance spécifique microondes Ps, durée d'intermittence DI et température de l'air Ta) pour les différentes réponses du plan d'expériences, à savoir les paramètres de couleur (Δa*, C* et Δh), la fermeté de la tomate (Ferm), le taux de lycopène résiduel (Lyc_rés.), durée de séchage (DS) et la consommation énergétique massique (CEM). L'exécution du programme de la régression multiple sous CORICO nous a permis d'avoir les modèles suivants basés sur des interactions logiques présentées dans le chapitre matériels et méthodes. Les résultats des modèles de régression et leur traduction sont les suivants :

- ***pour le paramètre couleur Δa* (coloration rouge)***

Δa* (ou *Da**) = 7,783 + 15.23 Ps&DI + 8,034 Ps#Ta + 5.802 Ps!DI + 8,761 Ps&-DI + 2,465 DI# Ta – 8,929 Ps}Ta + 1,702 Ps]-DI + 3,236 Ta}DI – 2,843 Ps{Ta (3.10) ;
cette équation a pour signification :
Δa* = 7,783+ 15,23 Ps et DI + 8,034 Ps comme Ta + 5,802 Ps strictement moyen et DI strictement moyen + 8,761 Ps et non DI + 2,465 DI comme Ta – 8,929 Ps si moyen Ta + 1,702 Ps si non DI + 3,236 Ta si moyen DI – 2,843 Ps moyen si Ta

- ***pour le paramètre couleur C* (saturation)***

C* = 51,13 + 11,61 DI#Ta + 8.930 Ps}Ta + 327,0 Ta}DI – 2,644 Ps+DI + 209,5 DI}Ta – 566,3 DI}DI – 2,532 Ta{DI + 2,762 Ps#-Ta + 3.213 DI#-Ta + 392.3 DI}Ps (3.11) ;
cette équation a pour signification :
C* = 51,13 + 11,61 DI comme Ta + 8,923 Ps si moyen Ta + 327,0 Ta si moyen DI – 2,644 Ps + DI + 209,5 DI si moyen Ta – 566,3 DI si moyen DI – 2,532 Ta moyen si DI + 2,762 Ps comme -Ta + 3,213 DI comme -Ta + 392,3 DI si moyen Ps

- ***pour le paramètre couleur Δh° (angle de teinte)***

Δh° = 2,069 + 14,33 DI{-Ta + 8,249 Ps*DI – 9,393 Ps}Ps + 6,939 Ps}DI (3.12) ;
cette équation a pour signification :

Δh° = 2,069 + 14,33 DI moyen si non Ta + 8,249 Ps ou exclusif DI – 9,393 Ps si moyen Ps + 6,939 Ps si moyen DI

- ***pour le paramètre de fermeté (Ferm)***

Ferm = 2,837 – 2,605 Ps}Ps + 1,023 Ps}DI – 1,067 Ps'DI (3.13);
cette équation a pour signification :
Ferm = 2,837 - 2,605 Ps si moyen Ps + 1,023 Ps si moyen DI - 1,067 Ps moyen et DI moyen

- ***pour le taux de lycopène résiduel (Lyc)***

Lyc = 61,73 – 14,61 Ps}Ta + 24,00 Ps#-Ta – 16,89 Ps*DI + 16,67 Ps}Ps – 33,97 DI]Ta + 7,080 Ps&-Ps (3.14);
cette équation a pour signification :
Lyc = 61,73 - 14,61 Ps si moyen Ta + 24,00 Ps comme -Ta - 16,89 Ps ou exclusif DI + 16,67 Ps si moyen Ps - 33,97 DI si Ta + 7,080 Ps et non Ps

- ***pour la durée de séchage (DS)***

DS = 122,9 – 20,20 DI#Ta – 68,74 Ps}Ta + 15,19 DI}Ps + 20,87 Ps}DI – 13,36 Ps&-Ps – 105,4 Ps]-Ps – 15,88 Ps#-DI – 46,85 Ta]-Ta – 32,11 DI]-Ps – 10,25 Ta{-Ps (3.15) ; cette équation a pour signification :
DS = 122,9 – 20,20 DI comme Ta – 68,74 Ps si moyen Ta+ 15,19 DI si moyen Ps + 20,87 Ps si moyen DI - 13,36 Ps et non Ps - 105,4 Ps si non Ps - 15,88 Ps comme -DI - 46,85 Ta si non Ta - 32,11 DI si non Ps - 10,25 Ta moyen si non Ps

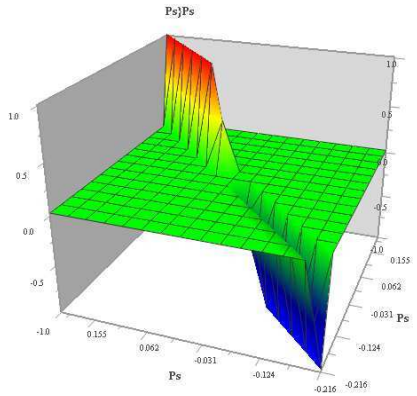
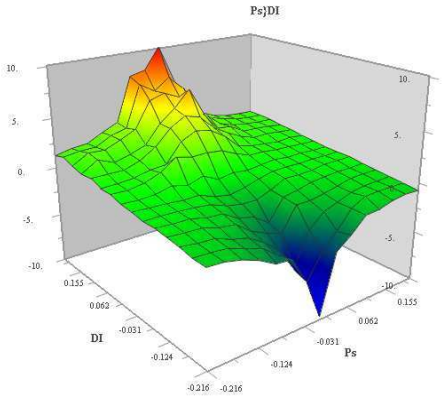
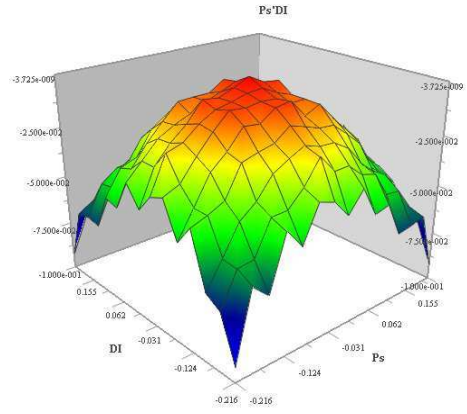
- ***pour la consommation énergétique massique (CEM)***

CEM = 113,5 – 55,37 Ps!DI – 136,5 Ps-Ta + 30,26 DI]-Ta (3.16) ;
cette équation a pour signification :
CEM= 113,504 – 55,37 Ps strictement moyen et DI strictement moyen - 136,5 Ps - Ta + 30,26 DI si non Ta.

Nous rappelons que les modèles CORICO sont constitués de régresseurs correspondant à des interactions logiques entre les facteurs. Par ailleurs, ces régresseurs sont ordonnés dans l'équation par ordre décroissant de leur corrélation partielle avec la réponse. Par exemple, dans le modèle de Δa*, l'interaction PS&DI est celle qui présente la plus forte corrélation partielle avec la réponse, c'est-à-dire expliquant la plus grande part de la variance de celle-ci. Pour ne pas trop alourdir le rapport nous détaillons ci-dessous pour exemple une équation courte, celle de la fermeté (Ferm). Le tableau 3.18 présente pour cette réponse chaque régresseur (équivalent à

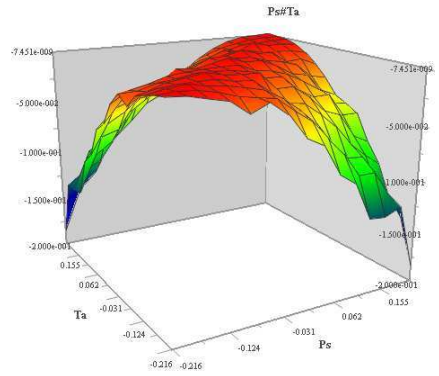
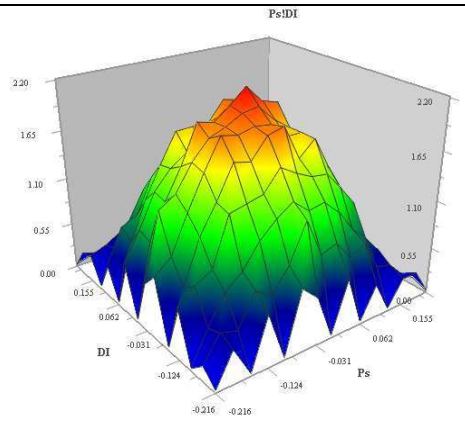
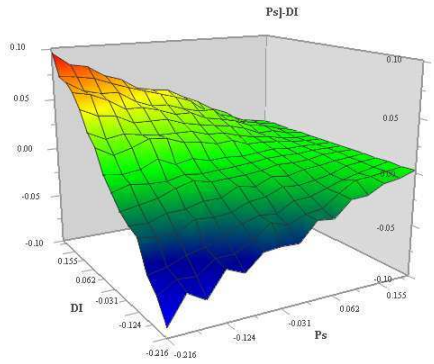
une interaction logique) et la surface de réponses correspondante. Le détail des autres équations est donné en annexe X.

**Tableau 3.18 -** *Présentation des interactions logiques (et les surfaces de réponses correspondantes), intervenant dans le modèle de la fermeté (Ferm)*

| Régresseur | Nom interaction - commentaires | Surface de réponse |
|---|---|---|
| Ps}Ps | Ps SI MOYEN Ps – La réponse Ferm est élevée quand Ps est élevé ou PS est moyen |   |
| Ps}DI | Ps SI MOYEN DI – La réponse Ferm est élevée lorsque Ps est fort si DI est moyen |   |
| Ps'DI (A'B) | Ps MOYEN ET DI MOYEN – La réponse Ferm est forte lorsque Ps et DI sont moyens |   |

Pour compléter ces explications, nous donnons dans le tableau 3.19 quelques interactions supplémentaires intervenant notamment dans le modèle de Δa*.

**Tableau 3.19-** *Quelques interactions logiques et leur surface de réponse*

| Régresseur | Nom interaction - commentaires | Surface de réponse |
|---|---|---|
| Ps#Ta | Ps COMME Ta – La réponse Δa* est forte quand Ps varie comme Ta |  |
| Ps!DI | Ps et DI STRICTEMENT MOYEN – La réponse Δa* est forte quand ni Ps ni DI ne sont extrêmes (ils sont strictement moyens) |  |
| Ps]-DI (A]-B) | Ps SI NON DI – La réponse Δa* est forte lorsque Ps est élevé si DI est faible |  |

Un modèle CORICO est donc une combinaison linéaire d'interactions logiques équivalant chacune à une surface de réponse. Ces combinaisons étant construites *a posteriori*, (après analyse des données du plan d'expériences), elles peuvent prendre des formes diversifiées afin de représenter au mieux les surfaces de réponses de chaque réponse du plan.

### III.3.2.2.2- Conditions optimales et validation des modèles sous CORICO

Pour l'obtention des conditions optimales, nous avons exécuté le programme d'optimisation multi réponse qui a permis d'obtenir un optimum pour les différents facteurs du séchage. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.20.

**Tableau 3.20-** *Conditions optimales déterminées avec le logiciel CORICO*

| Facteur | Bas | Haut | Optimum |
|---|---|---|---|
| **Ps (W/g)** | 3,0 | 7,0 | 5,1 |
| **DI (s)** | 1,0 | 300,0 | 105,3 |
| **Ta (°C)** | 30,0 | 50,0 | 36,9 |

Nous notons que hormis la durée d'intermittence qui est supérieure à celle obtenue par la méthode classique d'optimisation (64 sec.), les résultats obtenus pour la puissance spécifique Ps et la température de l'air Ta sont proches de ceux obtenus par la méthode classique, à savoir 5,18 W/g et 37°C.

VALIDATION

Trois essais de validation de cet optimum ont été réalisés et les résultats sont consignés dans un tableau en annexe IX, qui a permis de tracer la figure 3.44, représentant les valeurs des réponses expérimentales comparées à celles calculées par les différents modèles CORICO.

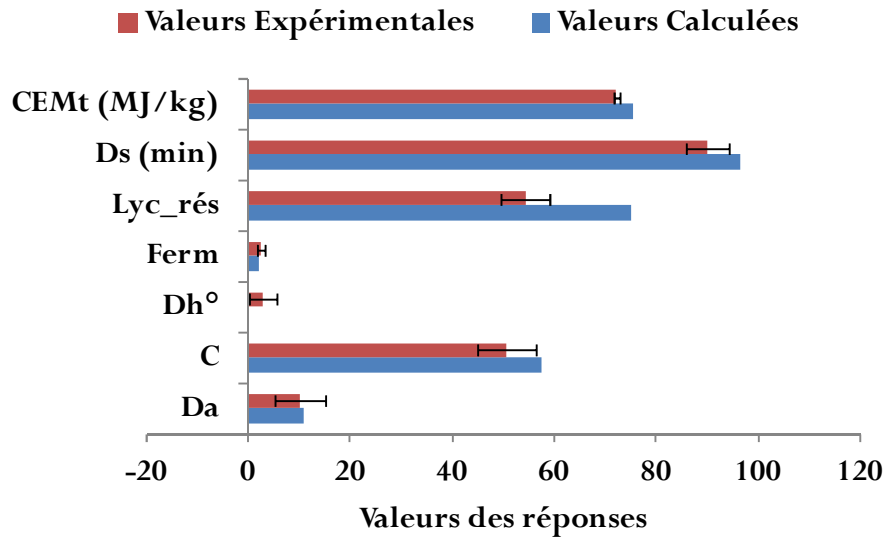



**Figure 3.44-** *Confrontation entre réponses mesurées et réponses prédites des différents modèles (obtenus par la méthode CORICO) pour les conditions optimales de séchage MOAC*

A l'analyse de la figure 3.44, il ressort que les réponses expérimentales sont proches des réponses calculées globalement, à l'exception du taux résiduel en lycopène expérimental qui n'est pas comparable à celui calculé.

C'est ce qui expliquerait le pourcentage de la corrélation entre les valeurs expérimentales et calculées de 97,28 %, inférieur à celui obtenu pour la validation par la méthode des surfaces de réponses (RSM) qui est de 99,05%. Toutefois cette corrélation est jugée bonne.

### III.3.2.3 – Comparaison des deux méthodes (classique et CORICO)

#### III.3.2.3.1- Surface de réponse en 3D

Nous présentons une synthèse des résultats obtenus à l'aide des deux méthodes d'optimisation sous forme de graphes 3D des surfaces de réponses. Les surfaces 3D obtenues par les deux méthodes sont comparées sur les figures 3.45 à 3.51.

- ***pour le paramètre couleur Δa* (coloration rouge)***

Pour le paramètre Δa*, globalement, nous avons le même aspect en termes de surface de réponse (figure 3.45), sauf qu'avec la méthode CORICO les surfaces ne sont pas lisses et cela fait ressortir un point maximum, pour le paramètre variation de la couleur rouge (Δa*) de la tomate, alors qu'avec la méthode classique nous avons une surface maximale.

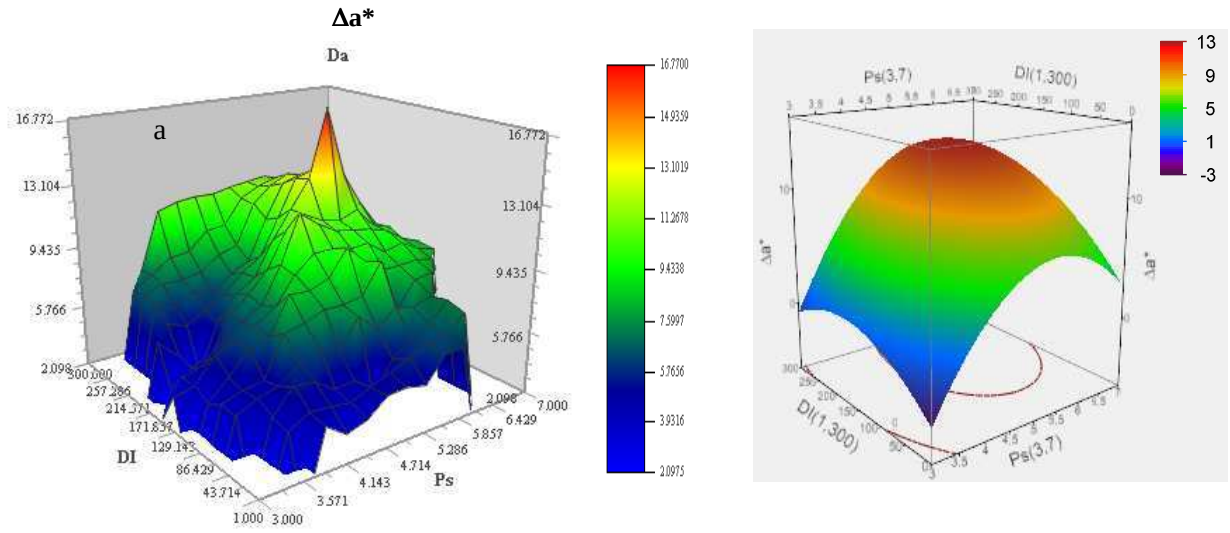



**Figure 3.45-** *Comparaison surface de réponse 3D du paramètre couleur Δa* : a-méthode CORICO ; b-méthode classique*

- ***pour le paramètre couleur C* (saturation)***

Pour le paramètre saturation C*, bien qu'on ait un aspect semblable dans l'ensemble pour la surface de réponse (figure 3.46), la surface maximale, fait néanmoins ressortir quelques points

plus élevés que d'autres capables d'être déterminés avec précision grâce à un marqueur (propre au logiciel). Exemple le point le plus élevé est au coordonnée (4,10 : 57,78) i.e. (3,571 W/g, 214, 57 sec.). Ce qui n'est pas le cas pour le graphe réalisé avec la méthode classique.

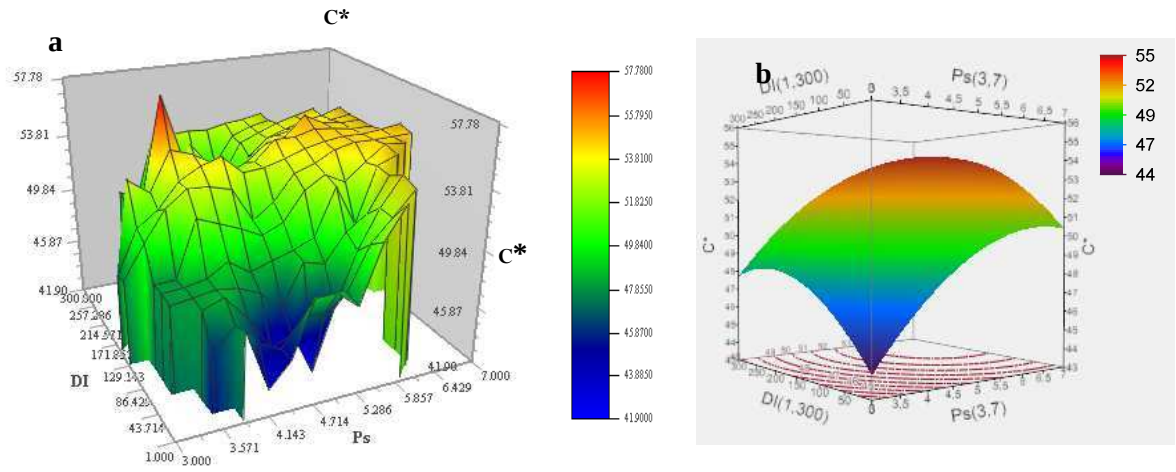



**Figure 3.46-** *Comparaison des surfaces de réponse 3D du paramètre couleur C* : a-méthode CORICO ; b-méthode classique*

- ***pour le paramètre couleur Δh° (angle de teinte)***

Le paramètre variation de la couleur de teinte (Δh°) (figure 3.47) donne plus de précision sur le minimum, à savoir qu'il ne se trouve pas sur toute la bande inférieure de la surface ; mais sur une surface bien délimitée. Toutefois grâce, à la rotation de la surface 3D, on retrouve le point minimum sous forme de pointe immergé d'un iceberg dans la partie médiane correspondant aux coordonnées (5,857 W/g, 40°C : -4,55).

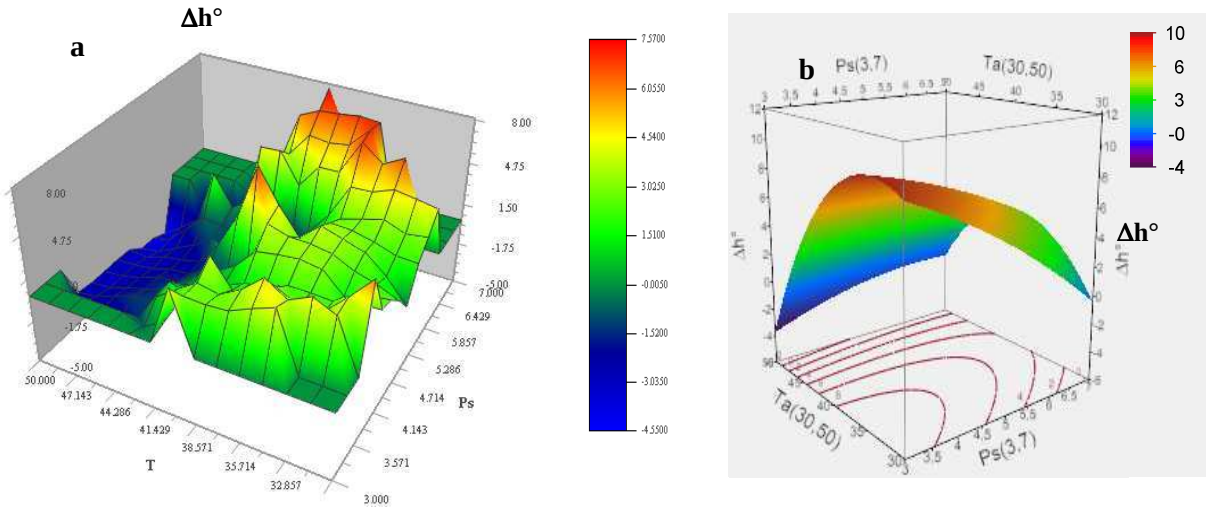



**Figure 3.47-** *Comparaison des surfaces de réponse 3D du paramètre couleur Δh° : a-méthode CORICO ; b-méthode classique*

- ***pour le paramètre de fermeté (Ferm)***

Pour la fermeté (figure 3.48) le graphe du modèle CORICO, nous indique plus précisément la surface minimale. A savoir que la fermeté minimale se situe entre une valeur de Ps de 5,286 et 5,857 W/g. Alors que le graphe obtenu par la méthode classique nous indique que toute la surface inférieure est minimale. En plus la fermeté maximale est obtenue à la température médiane de 40°C et à la puissance de 3, 86 W/g dans la méthode CORICO ; alors que la méthode classique prévoit le maximum de fermeté à une température plus élevée, 50°C et à faible puissance (3 W/g).

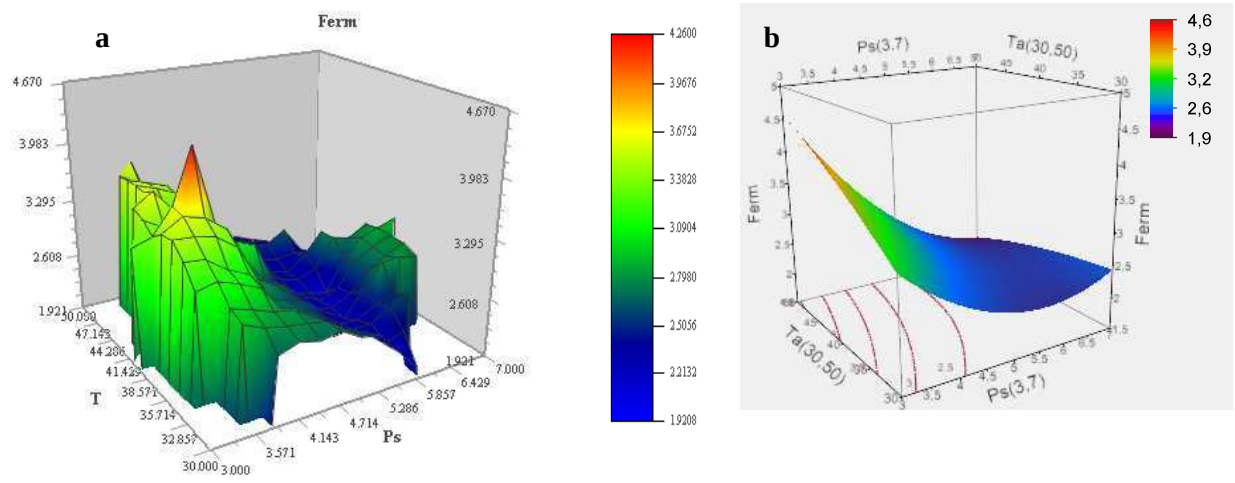



**Figure 3.48-** *Comparaison des surfaces de réponse 3D de la fermeté : a-méthode CORICO ; b-méthode classique*

- ***pour le taux de lycopène résiduel (Lyc)***

Pour le taux résiduel de lycopène (figure 3.49), l'allure générale des graphes est similaire. Toutefois, ils se différencient au niveau des surfaces à taux de lycopène minimaux. Celle obtenu avec la méthode CORICO est plus large. Elle commence à la DI de 65,07 secondes jusqu'à la DI max (300 sec.) alors que celle obtenue par la méthode classique commence à la DI de 150 secondes, réduisant ainsi sa surface minimale de taux de lycopène résiduel.

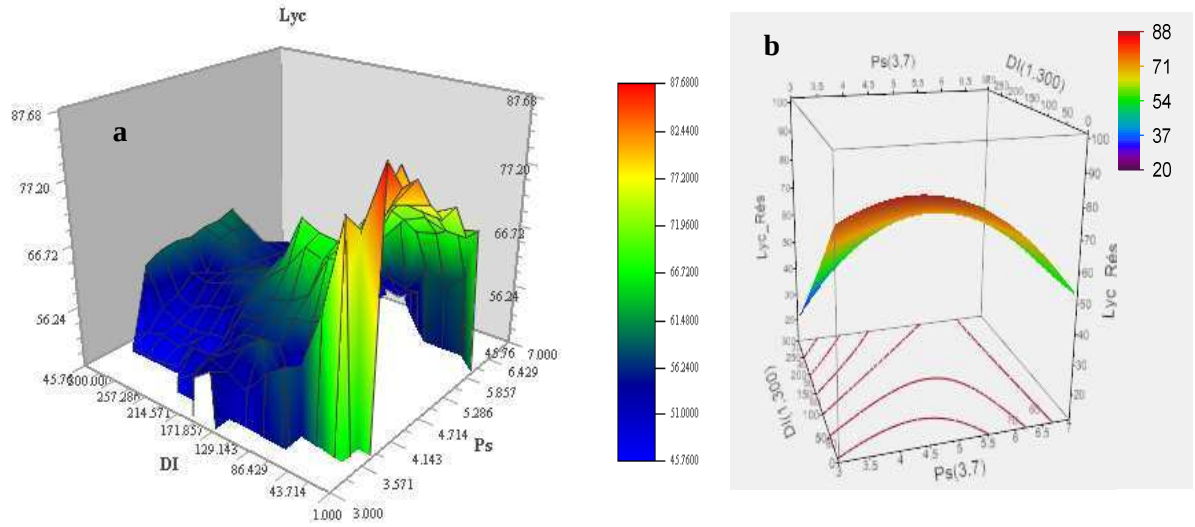



**Figure 3.49-** *Comparaison des surfaces de réponse 3D du taux résiduel de lycopène : a-méthode CORICO ; b-méthode classique*

- ***pour la durée de séchage (DS)***

Pour la durée de séchage (DS) (figure 3.50), on a une tendance similaire entre les deux graphes pour les conditions optimales d'obtention du minimum de DS. Quant à l'obtention du maximum de la durée de séchage, elle est prédite pour la méthode d'optimisation classique aux valeurs faibles de Ps et Ta, dû à la durée de séchage plus longue. Alors que la méthode CORICO prévoit un DS maximum à Ta moyen (40°C) et Ps basse (3 W/g).

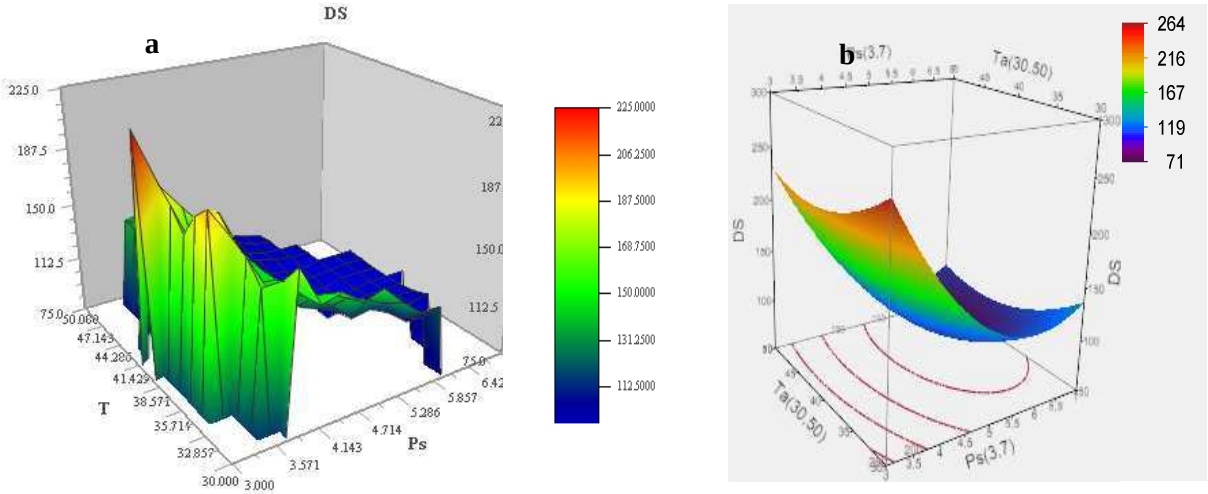



**Figure 3.50-** *Comparaison des surfaces de réponse 3D de la durée de séchage: a-méthode CORICO ; b-méthode classique*

- ***pour la consommation énergétique massique (CEM)***

Les graphes de la figure 3.51 obtenus pour la consommation énergétique massique par les deux méthodes d'optimisation (CORICO et classique) sont presque identiques, pour les conditions optimales à l'obtention du minimum de CEM. Cependant pour une CEM maximale, la méthode CORICO donne une possibilité de jouer sur Ta (T) à partir de sa valeur médiane jusqu'à sa valeur élevée, et sur Ps à partir de sa valeur faible jusqu'à sa valeur moyenne. Ce qui n'est pas cas de la méthode classique où CEM maximale est obtenu uniquement à Ta élevé et Ps faible.

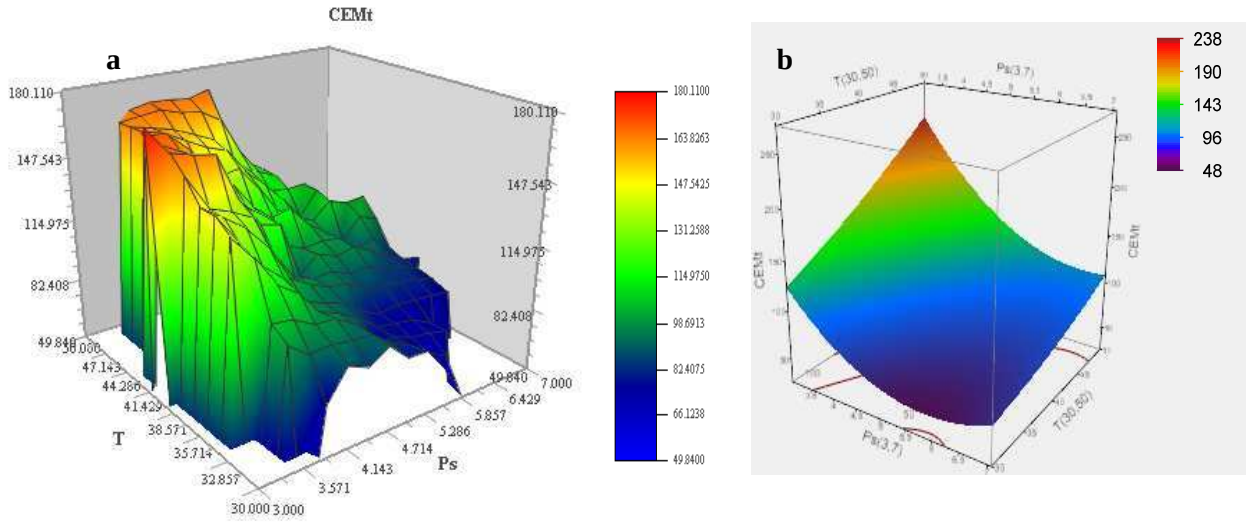



**Figure 3.51-** *Comparaison des surfaces de réponse 3D de la consommation énergétique massique : a-méthode CORICO; b-méthode classique*

En conclusion, il faut retenir une tendance presqu'identique de l'allure globale des surfaces de réponse pour les deux méthodes pour les différentes variables réponses, hors mis quelque particularités. Il faut aussi noter que les surfaces de réponses obtenues par la méthode CORICO sont moins lisses, donnant donc plus de précision au niveau des valeurs optimales comparées à celles obtenues par la méthode classique (RSM).

### III.3.2.3.2- Rapport F

Le rapport F est le rapport utilisé par la distribution de Fisher et qui représente le rapport du carré moyen (CM) du modèle au carré moyen du résidu (**Goupy**, 2005). Ce rapport F mesure la probabilité que la variance expliquée par le modèle ne soit pas différente de la variance du résidu. Plus ce rapport est élevé plus la probabilité est faible et c'est ce qui est recherché. Le tableau 3.21 illustre la comparaison du rapport F de la méthode classique et CORICO pour l'optimisation.

**Tableau 3.21-** *Comparaison des rapports F des méthodes d'optimisation Classique et CORICO*

| Réponses | Modèles quadratiques | | Modèles CORICO | |
|---|---|---|---|---|
| | Nombre de coeff. | Rapport F | Nombre de coeff. | Rapport F |
| Δa* | 9 | 3,340 | 10 | 8,628 |
| C* | 9 | 0,737 | 11 | 2,490 |
| Δh° | 9 | 0,739 | 5 | 4,288 |
| Ferm | 9 | 0,747 | 4 | 9,876 |
| Lyc_Rés. | 9 | 7,437 | 7 | 39,79 |
| DS | 9 | 19,66 | 11 | 709,0 |
| CEM | 9 | 16,27 | 4 | 62,16 |

Les deux méthodes utilisées sont des méthodes de régression; la méthode classique utilise un modèle quadratique à 9 coefficients pour chaque variable réponse, et celle de CORICO, un modèle d'interaction logique à 10, 11, 5, 4, 7, 11 et 4 coefficients selon les variables réponses (tableau 3.23). Plus les coefficients sont élevés, meilleure est la prédiction des points utilisés pour l'ajustement. De ce fait, pour les réponses $\Delta a^*$, $C^*$ et DS, bien que les rapports F de la méthode CORICO soient supérieurs à ceux de la méthode classique, on ne peut conclure quant au fait que la méthode CORICO donne des modèles plus satisfaisants que la méthode classique des surfaces de réponses (RSM). Cependant pour les réponses Δh°, Ferm, Lyc_rés, et CEM, les rapports F de la méthode CORICO sont supérieurs à ceux de la méthode classique avec un nombre de coefficients de régression nettement inférieurs à ceux de la méthode classique. Dans ces cas nous pouvons conclure que les modèles de la méthode CORICO sont meilleurs à ceux de la méthode classique des surfaces de réponses.

## III.4- SYNTHESE DES RESULTATS

### III.4.1- ASPECT PROCEDE

Au cours de ces travaux de thèse, notre première stratégie de séchage microondes air chaud (MOAC) sans pilotage de la puissance spécifique, a permis de confirmer des résultats déjà rapportés dans la littérature (**Li, Raghavan & Orsat**, 2010a), à savoir, la carbonisation localisée du produit et donc la détérioration de la qualité physique. En effet, le séchage MOAC sans régulation de la puissance spécifique, conduit à une croissance exponentielle de celle-ci au cours du séchage, avec une augmentation de cette puissance spécifique d'un facteur 13 par rapport à sa valeur initiale. On aboutit ainsi à une dégradation de plus de la moitié de la teneur en lycopène de la tomate et à l'apparition de nombreuses zones de surchauffe matérialisées par des points noirs. Le seul moyen d'éviter ces inconvénients est de réaliser le séchage à très faible puissance spécifique initiale avec comme corollaire une augmentation de la durée de séchage. On peut donc conclure qu'une telle procédure de séchage MOAC présentera peu d'intérêt au niveau industriel.

En ce qui concerne le séchage microondes air chaud avec pilotage de la puissance spécifique ($P_s$), sa mise en œuvre a été possible pour les deux modes d'adaptation de la puissance spécifique (en continue et par intermittence), pour les trois températures d'air étudiées. Toutefois en fin de régulation, la puissance spécifique connait des fluctuations plus ou moins importantes par rapport au début du séchage. Ce qui pourrait entraîner des phénomènes d'emballements thermiques, avec la faible masse du produit, si ces fluctuations ne sont pas maîtrisées.
Nous avons aussi observé que la vitesse de séchage de la tomate augmente avec celle de la puissance spécifique ; et que la température de l'air n'a presque pas d'influence sur cette vitesse de séchage. Cela signifie que, pour réduire la durée du traitement d'un produit, au cours d'un séchage microondes assistés par air chaud, il faut chercher à augmenter la puissance microondes plutôt que d'augmenter la température de l'air, celui-ci jouant surtout un rôle de vecteur pour l'élimination de la vapeur d'eau provenant de la surface du produit. De ce fait, il est plus intéressant de travailler à basse température pour des raisons d'économie d'énergie sans toutefois descendre en deçà d'un certain niveau d'humidité relative de l'air pour éviter de compromettre le flux d'eau entre la surface du produit et l'air de séchage.
D'autre part, nous pouvons constater que le pilotage de la puissance spécifique engendre une baisse puis une stabilisation de la température du produit en fin de séchage. On peut donc dire que cette action sur la puissance spécifique permet indirectement de réguler la température du produit en fin de séchage et donc de prévenir l'emballement thermique. Dans la pratique en agissant sur la cause (Ps) de l'emballement thermique nous avons obtenus la baisse de son effet (température du produit) et des produits de bonne qualité visuelle exempts de points chauds.

La comparaison des deux modes de régulation, révèle que l'adaptation de la puissance appliquée par intermittence de 5 min, permet de réduire la consommation énergétique massique seulement à faible température (30°C) quelque soit la puissance microondes appliquée. En définitif, le nouveau système de pilotage de la puissance spécifique développé sous le logiciel LabView®, a non seulement permis d'automatiser le séchage MOAC avec mesure de la masse et de la température du produit *in situ* et online, mais également permis de résoudre l'épineux problème de carbonisation localisée du produit au cours du séchage. Toutefois les valeurs obtenues pour la consommation énergétique massique sont très élevées comparées à celles obtenues habituellement pour un séchage. Cela est dû essentiellement à notre séchoir pilote qui n'est pas du tout isolé thermiquement, ce qui limite la portée des résultats obtenus sur le point de vue énergétique.

### III.4.2- ASPECT QUALITE

La seconde stratégie de séchage MOAC où *Ps* est régulé selon deux modes a permis d'obtenir des tomates séchées avec une qualité visuelle et nutritionnelle (en lycopène) améliorée comparée à la première stratégie (séchage MOAC sans régulation de *Ps*). De ce fait, compte tenu de la mauvaise qualité physico-chimique de la tomate obtenue par la stratégie 1, nous avons voulu comparer la qualité physico-chimique de la tomate améliorée (par la nouvelle stratégie de séchage) avec celle de deux tomates commerciales de référence séchées au soleil.

Les résultats nous indiquent qu'au niveau de la qualité physique, la couleur de la tomate séchée par la stratégie 2 (séchage MOAC avec régulation de *Ps*) selon le mode 1 (régulation en continu), est de meilleure qualité (avec un rouge vif) comparée aux tomates commerciales (rouges sombres). Quant à la texture de la tomate améliorée (par la stratégie 2), elle est comparable à celle de la tomate séchée au soleil avec une fermeté plus importante que celle de la tomate fraiche, donc non appréciable. Cependant, il est observé que, la tomate commerciale prétraitée osmotiquement avec du sel (NaCl) avant le séchage au soleil a une meilleure fermeté comparée aux deux précédentes. D'où l'intérêt de faire un prétraitement osmotique de la tomate avant le séchage microondes air chaud, qui pourrait améliorer la texture de la tomate, comme l'ont déjà observé **Heredia, Barrera, & Andrés** (2007) pour le prétraitement osmotique au sel de la tomate cerise avant le séchage MOAC.

La structure de la tomate améliorée (par séchage MOAC avec pilotage de $P_s$) observée par microscopie électronique à balayage (MEB) présente plus de pores comparée à celle des tomates commerciales de référence (avec une quasi absence de pores). La tomate améliorée aura une facilité de réhydratation (due aux pores) et appréciable par le consommateur, par rapport aux tomates commerciales (presque sans pores) et plus dures.

Quant à la teneur résiduelle en lycopène, les travaux ont montré que le séchage MOAC avec pilotage de la puissance spécifique, permet une meilleure rétention du lycopène par rapport aux

tomates séchées au soleil. Cela est dû à la durée de séchage des tomates de référence, favorable à l'oxydation du lycopène et donc à sa dégradation. Toutefois l'augmentation de la puissance microondes dégrade la teneur en lycopène,l'utilisation d'une puissance modérée s'avère nécessaire.

On peut donc affirmer que notre stratégie de séchage mise en place, et qui utilise juste la puissance nécessaire à l'élimination de l'eau, permet d'obtenir une tomate de meilleure qualité nutritionnelle par rapport à celle du commerce. Elle est donc à conseiller et applicable en milieu industriel.

Au niveau qualité, nous avons aussi comparé les deux modes de régulation, et les résultats nous indiquent que le séchage MOAC avec pilotage par intermittence de $P_s$ est plus dégradant pour le lycopène. Mais compte tenu du fait que ce mode permet de réaliser une économie d'énergie à faible température quelque soit la puissance microondes appliquée, nous ne pouvions dire exactement lequel des modes était le meilleur. Alors l'optimisation du système de séchage MOAC nous a permis d'avoir la réponse à notre interrogation.

### III.4.3- ASPECT OPTIMISATION ET MODELISATION

L'optimisation du procédé a permis de trouver le meilleur compromis au niveau des conditions de séchage pour un produit de bonne qualité physico-chimique et à meilleur coût. Les résultats indiquent qu'il faut effectivement une puissance microondes moyenne (donc modérée) autour de 5 W/g, une température de l'air de séchage moyenne aussi (autour de 37 °C et une durée d'intermittence (fréquence de pilotage) faible entre 1 min. 4 sec. (méthode des surfaces de réponses) à 1 min. 45 sec. (méthode CORICO).

Pour ce qui est de la prédiction du comportement au séchage de l'humidité de la demi-tomate, après le test des 6 modèles semi-empiriques (1-Modèle de Page, 2- Modèle logarithmique; 3-Modèle de Midilli; 4- Modèle deux termes; 5- Modèle de l'approche diffusionnelle ; 6 –Modèle d'Henderson et Pabis modifié) seul le modèle *d'Henderson et Pabis modifié* permet de mieux ajuster les données expérimentales des données calculées. Le modèle trouvé permet d'avoir uniquement une idée du type de modèle que décrivent les données expérimentales. En effet, pour de nouvelles conditions, il faudra recalculer de nouveaux coefficients pour le modèle d'*Henderson et Pabis modifié*.

## CONCLUSION GENERALE & PERSPECTIVES

Cette étude ainsi que de nombreuses autres montrent qu'il est possible de réaliser un séchage microondes/air chaud d'un fruit-légume telle que la tomate en maintenant constante la puissance microonde appliquée. Mais ce travail indique aussi que le maintien à une valeur constante de la puissance microondes appliquée au cours du séchage entraine une hausse de la température du produit en fin de séchage préjudiciable à sa qualité. Pour éviter cela, il est nécessaire de travailler à faible puissance pendant toute la durée du séchage, ce qui a pour conséquence d'augmenter la durée de séchage et donc de limiter de fait l'intérêt d'un séchage microondes vis-à-vis d'un séchage classique. Aussi, une nouvelle méthode de séchage microondes air chaud (MOAC) a été développée dans le cadre de ce travail afin d'améliorer la qualité de la tomate séchée sans pour autant être obligé de travailler à très faible puissance, ceci grâce au pilotage de la puissance microondes qui est adaptée à la masse résiduelle du produit, donc de l'eau à éliminer, ce qui a pour incidence de maîtriser la température du produit et donc d'éviter les phénomènes d'emballement thermique habituellement observés lors du séchage MOAC à puissance appliquée fixe.

Grâce à cette méthode nous obtenons une amélioration significative de la couleur de la tomate séchée et évitons l'apparition des points chauds. En outre, le taux résiduel en lycopène en fin de séchage est significativement plus élevé que celui observé dans les tomates séchées commerciales (d'origine italienne et ivoirienne) obtenues par séchage solaire.

Cette étude montre que l'amélioration de la qualité du produit a surtout été possible grâce à la diminution de la température du produit en fin de séchage, évitant ainsi le phénomène d'emballement thermique.

L'incidence de la fréquence d'adaptation de la puissance spécifique à la masse du produit, pour deux fréquences, une seconde et 5 minutes, sur la qualité du produit sec et sur la consommation énergétique, montre que :

- ces deux fréquences ont des effets quasi identiques sur la qualité physique (couleur, texture) de la tomate,
- la fréquence de 5 minutes a un effet dégradant sur la teneur en lycopène de la tomate, et la consommation énergétique est plus faible en pilotage à cette fréquence appliquée avec une faible température d'air (30°C).

Une méthode de modélisation semi-empirique à été utilisée pour prédire le comportement de la teneur en eau de la demi-tomate au cours du séchage. Des différents modèles de la littérature testés, celui d'*Handerson* et *Pabis modifié* s'est révélé le plus juste pour prédire les données expérimentales du séchage MOAC avec régulation de la puissance spécifique de la demi-tomate.

L'utilisation de la méthode des plans d'expériences pour surfaces de réponse a permis d'optimiser le procédé de séchage MOAC en termes de qualité de la tomate séchée (couleur, texture, teneur en lycopène), de durée de séchage et de consommation énergétique. Il en

ressort que le meilleur compromis est obtenu pour les conditions suivantes : une puissance spécifique de 5,1 W/g, une fréquence d'adaptation de la puissance de 105 s et une température d'air de 37°C.

L'instrumentation du pilote de séchage a permis d'acquérir de nombreuses données sur le séchage, notamment l'évolution au cours du temps de la masse et de la température à cœur du produit, de la puissance appliquée et de la consommation d'énergie. Toutefois il faut souligner certaines limites de validité de ces informations obtenues sur un séchoir pilote. En particulier la mauvaise isolation thermique et l'utilisation d'air chaud perdu (c.à.d. sans recyclage partiel) éloignent ces cinétiques de ce qu'elles pourraient être sur un pilote "optimisé". L'amélioration du pilote doit être envisagée de ce point de vue, de même que le système de pesée du produit afin de stabiliser la mesure, par exemple en déviant le courant d'air chaud au moment de la pesée. Ceci devrait aboutir à une adaptation de la puissance moins fluctuante, et par ricochet à un séchage plus régulier. Par ailleurs, dans le cadre de l'amélioration du pilote de séchage, on pourrait envisager d'établir une relation entre une mesure indirecte de l'humidité du produit (par exemple par infrarouge) et la puissance appliquée. Cette relation pourrait alors être implémentée dans le programme de pilotage LabView pour adapter à chaque instant la puissance appliquée au taux d'humidité du produit. L'intérêt d'une telle relation serait de faciliter le transfert industriel du séchage MOAC.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**Abbasi, S. B., & Mowla, D**. (2008). Simulation of drying behaviour of a small spherical foodstuff in a microwave assisted fluidized bed of inert particles. *Food Res. Int. Food Research International*, *41*(3), 255-265.

**Adedeji, A. A., Ngadi, M. O., & Raghavan, G. S. V.** (2009). Kinetics of mass transfer in microwave precooked and deep-fat fried chicken nuggets. *Journal of Food Engineering*, *91*(1), 146-153.

**ADEME.** (1998). Mise en place d'un procédé de séchage par microondes. Bonnes pratiques énergétiques. France.

**Adu, B., & Otten, L.** (1996). Diffusion Characteristics of White Beans During Microwave Drying. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *64*(1), 61-69.

**Agarwal, S., & Rao, A. V.** (2000). Tomato lycopene and its role in human health and chronic diseases. *Canadian Medical Association Journal*, *163*(6), 739 -744.

**Akanbi, C. T., Adeyemi, R. S., & Ojo, A.** (2006). Drying characteristics and sorption isotherm of tomato slices. *Journal of Food Engineering*, *73*(2), 157-163.

**Al-Harahsheh, M., Al-Muhtaseb, A. H., & Magee, T. R. A.** (2009). Microwave drying kinetics of tomato pomace: Effect of osmotic dehydration. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *48*(1), 524-531.

**Alibas, I.** (2007). Microwave, air and combined microwave air-drying parameters of pumpkin slices. *LWT - Food Science and Technology*, *40*(8), 1445-1451.

**Al-Muhtaseb, A. H., Al-Harahsheh, M., Hararah, M., & Magee, T. R. A.** (2010). Drying characteristics and quality change of unutilized-protein rich-tomato pomace with and without osmotic pre-treatment. *Industrial Crops and Products*, *31*(1), 171-177.

**Amouzgar, P., Abdul Khalil, H. P. S., Salamatinia, B., Zuhairi Abdullah, A., & Issam, A. M**. (2010). Optimization of bioresource material from oil palm trunk core drying using microwave radiation; a response surface methodology application. *Bioresource Technology*, *101*(21), 8396-8401.

**Andres, A., Bilbao, C., & Fito, P.** (2004). Drying kinetics of apple cylinders under combined hot air -microwave dehydration. *Journal of Food Engineering*, *63*(1), 71-78.

**Anguelova, T., & Warthesen, J.** (2000). Food Chemistry and Toxicoloy - Lycopene Stability in Tomato Powders. *Journal of food science : an official publication of the Institute of Food Technologists.*, *65*(1), 67-70.

**Anthon, G. E., & Barrett, D. M.** (2010). Changes in pectin methylesterification and accumulation of methanol during production of diced tomatoes. *Journal of Food Engineering*, *97*(3), 367-372.

**AOAC.** (1990). Official method of analysis. Association of Official Analytical Chemists (No. 934.06),

**Ãvila, I. M. L. B., & Silva, C. L. M.** (1999). Modelling kinetics of thermal degradation of colour in peach puree. *Journal of Food Engineering*, *39*(2), 161-166.

**Barreiro, J. A., Milano, M., & Sandoval, A. J.** (1997). Kinetics of colour change of double concentrated tomato paste during thermal treatment. *Journal of Food Engineering*, *33*(3-4), 359-371.

**Bauernfeind, J. C., Stewart, G. F., Schweigert, B. S., & Hawthorn, J.** (1981). *Carotenoids as Colorants and Vitamin A Precursors: Technological and Nutritional Applications*. Academic Press.

**Beecher, G. R.** (1998). Nutrient content of tomatoes and tomato products. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine. Society for Experimental Biology and Medicine (New York, N.Y.)*, *218*(2), 98-100.

**Benhamou A., Idlimam A., Lamharrar A., Benyoucef B., Kouhila M.** (2008). Diffusivité hydrique et cinétique de séchage solaire en convection forcée des feuilles de marjolaine. *Revue des Energies Renouvelables,* Vol. 11 (1) 75 – 85.

**Bhuvaneswari, V., & Nagini, S.** (2005). Lycopene: A Review of Its Potential as an Anticancer Agent. *Current Medicinal Chemistry - Anti-Cancer Agents*, *5*(6), 627-635.

**Bilbao-Sainz, C., Andrés, A., Chiralt, A., & Fito, P.** (2006). Microwaves phenomena during drying of apple cylinders. *Journal of Food Engineering*, *74*(1), 160-167.

**Bimbenet, J. J.** (1984). *Le séchage dans les industries agricoles et alimentaires* (Cahiers du GIA,SEPAIC.). Paris, France.

**Bimbenet, J.-J., & Bonazzi, C.** (2003). Séchage des produits alimentaires - Principes. *Techiniques de l'ingénieur*, (F 3000), 14p.

**Bimbenet, J.-J., Bonazzi, C., & Dumoulin, C.** (2002). L'eau en séchage, stockage et réhydratation. *L'eau dans les aliments* (Lavoisier.).

**Bimbenet, J.-J., Duquenoy, A., & Trystram, G.** (2002). *Génie des procédés alimentaires: des bases aux applications*. Dunod.

**Boskovic, M. A.** (1979). Fate of Lycopene in Dehydrated Tomato Products: Carotenoid Isomerization in Food System. *Journal of Food Science*, *44*(1), 84-86.

**Botha, G. E., Oliveira, J. C., & Ahrné, L.** (2011). Quality optimisation of combined osmotic dehydration and microwave assisted air drying of pineapple using constant power emission. *Food and Bioproducts Processing*, (0), Article in press.

**Bouchier, D., Mathet, V., Belier, B., & Roy, A.** (2008). Micro fabrication de matrice de bolomètre dans le cadre du projet DCMB. *l'aCTU*, *2*(2).

**Boughali, S., Benmoussa, H., Bouchekima, B., Mennouche, D., Bouguettaia, H., & Bechki, D.** (2009). Crop drying by indirect active hybrid solar â€“ Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. *Solar Energy*, *83*(12), 2223-2232.

**Boumendjel, M., Boutebba, A., & Houhamdi, M.** (2002). Effet des traitements thermiques sur les antioxydants de la tomate. *Synthèse n°11*, p. 78-85. Annaba.

**Buffler, C. R.** (1993). *Microwave Cooking and Processing: Engineering Fundamentals for the Food Scientist*. Aspen Publishers. Newyork, 220p.

**Callebaut, J.** (2007). Efficacité énergétique section 7 : chauffage par diélectrique. . *Leonardo ENERGY. Guide Power Quality.*, pp 1-12.

**Cao, G., Sofic, E., & Prior, R. L.** (1997). Antioxidant and Prooxidant Behavior of Flavonoids: Structure-Activity Relationships. *Free Radical Biology and Medicine*, *22*(5), 749-760.

**Carroll, M. B., & Churchill, S. W.** (1986). A numerical study of periodic on-off versus continuous heating by conduction. *Numerical Heat Transfer*, *10*, 297-310.

**CEE-ONU.** (2007). *Norme CEE-ONU DDP-19 concernant la commercialisation et le contrôle de la qualité commerciale des tomates séchées*. New York, Genève.8p.

**Changrue, V., Orsat, V., & Raghavan, G. S. V.** (2008). Osmotically Dehydrated Microwave-vacuum Drying of Strawberries. *Journal of Food Processing and Preservation*, *32*(5), 798-816.

**Chen, J., Shi, J., Xue, S. J., & Ma, Y.** (2009). Comparison of lycopene stability in water- and oil-based food model systems under thermal- and light-irradiation treatments. *LWT - Food Science and Technology*, *42*(3), 740-747.

**Chiralt, A., & Talens, P.** (2005). Physical and chemical changes induced by osmotic dehydration in plant tissues. *Journal of Food Engineering*, *67*(1-2), 167-177.

**Clary, C. D., Wang, S., & Petrucci, V. E.** (2005). Fixed and Incremental Levels of Microwave Power Application on Drying Grapes under Vacuum. *Journal of Food Science*, *70*(5), 344-349.

**Cohen, J. S., & Yang, T. C. S.** (1995). Progress in food dehydration. *Trends in Food Science & Technology*, *6*(1), 20-25.

**Conn, P. F., Schalch, W., & Truscott, T. G.** (1991). The singlet oxygen and carotenoid interaction. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, *11*(1), 41-47.

**Copson, D. A.** (1975). Microwave Heating. *AVI Publ.Co., Westport, Connecticut*, 285p.

**CORIYENT Conseil**. (2009). *Manuel de formation à CORICO Tome 4. Version 4.0 pour windows.* 53 p.

**Crank, J.** (1975). *The mathematics of diffusion*. 2nd Ed Oxford, Clarendon Press 414p.

**Cui, Z.-W., Xu, S.-Y., Sun, D.-W., & Chen, W.** (2005). Temperature Changes during Microwave-Vacuum Drying of Sliced Carrots. *Drying Technology*, *23*, 1057-1074.

**Daudin, J. D.** (1983). Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides. *Sciences des Aliments*, *14*(10), 1-36.

**Davies, J. N., & Hobson, G. E.** (1981). The constituents of tomato fruit--the influence of environment, nutrition, and genotype. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *15*(3), 205-280.

**De los Reyes, R., Heredia, A., Fito, P., De los Reyes, E., & Andrés, A.** (2007). Dielectric spectroscopy of osmotic solutions and osmotically dehydrated tomato products.

*Journal of Food Engineering*, *80*(4), 1218-1225.

**De Roeck, A., Mols, J., Duvetter, T., Van Loey, A., & Hendrickx, M.** (2010). Carrot texture degradation kinetics and pectin changes during thermal versus high-pressure/high-temperature processing: A comparative study. *Food Chemistry*, *120*(4), 1104-1112.

**Decareau, R. V., & Peterson, R. A.** (1986). *Microwave processing and engineering*. VCH Publ.

**Diamante, L. M., & Munro, P. A.** (1993). Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, *51*(4), 271-276.

**Djedjro A. C.** (2009). *Modélisation du séchage solaire des fèves de cacao*. Thèse Université Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire.

**Doymaz I.** (2007). Air-drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*, *78*(4), 1291-1297.

**Duan, X., Zhang, M., & Mujumdar, A.** (2007). Studies on the Microwave Freeze Drying Technique and Sterilization Characteristics of Cabbage. *Drying Technology*, *25*(10), 1725-1731.

**Duan, X., Zhang, M., Li, X., & Mujumdar, A. S.** (2008a). Microwave Freeze Drying of Sea Cucumber Coated with Nanoscale Silver. *Drying Technology*, *26*, 413-419.

**Duan, X., Zhang, M., Li, X., & Mujumdar, A. S.** (2008b). Ultrasonically Enhanced Osmotic Pretreatment of Sea Cucumber Prior to Microwave Freeze Drying. *Drying Technology*, *26*, 420-426.

**Dumais O.** (1999). *La Gastronomie en Plein Air*. Quebec Amerique.

**Duygu, E.** (2011). Thin layer drying kinetics of Gundelia tournefortii L. *Food and Bioproducts Processing*, (0), Article in press.

**El-Sebaii, A. , Aboul-Enein, S., Ramadan, M. R., & El-Gohary, H.** (2002). Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer. *Energy Conversion and Management*, *43*(16), 2251-2266.

**Erbay, Z., & Icier, F.** (2009). Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. *Journal of Food Engineering*, *91*(4), 533-541.

**Farkas, I., & Rendik, Z.** (1997). Intermittent Thin Layer Corn Drying. *Drying Technology*, *15*(6/8), 1951-1960.

**Feng, H., & Tang, J.** (1998). Microwave Finish Drying of Diced Apples in a Spouted Bed. *Journal of Food Science*, *63*(4), 679-683.

**Fish, W. W., Perkins-Veazie, P., & Collins, J. K.** (2002). A Quantitative Assay for Lycopene That Utilizes Reduced Volumes of Organic Solvents. *Journal of Food Composition and Analysis*, *15*(3), 309-317.

**Fred Gey, K.** (1998). Vitamins E plus C and interacting conutrients required for optimal health. *BioFactors*, *7*(1-2), 113-174.

**Funebo, T., & Ohlsson, T.** (1998). Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering*, *38*(3), 353-367.

**Giovanelli, G., Zanoni, B., Lavelli, V., & Nani, R.** (2002). Water sorption, drying and antioxidant properties of dried tomato products. *Journal of Food Engineering*, *52*(2), 135-141.

**Giovannucci, E., Ascherio, A., Rimm, E. B., Stampfer, M. J., Colditz, G. A., & Willett, W. C.** (1995). Intake of carotenoids and retinol in relation to risk of prostate cancer. *Journal of the National Cancer Institute*, *87*(23), 1767-1776.

**Giri, S. K., & Prasad, S.** (2007). Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *Journal of Food Engineering*, *78*(2), 512-521.

**Goula, A. M., & Adamopoulos, K. G.** (2005). Stability of lycopene during spray drying of tomato pulp. *LWT - Food Science and Technology*, *38*(5), 479-487.

**Goupy, J.** (2005). *Pratiquer les plans d'expériences*. Paris: Dunod.

**Govarerts B., & Leboulengé E.** (2000). *Planification expérimentale : méthodologie et techniques.* (Universitaire CIACO (DUC)., Vol. 1).

**Grolier P.** (1999). Antioxidants in the tomato fruit. In: Role and control of antioxidants in the tomato processing industry, Second bulletin on the advancement of research. A European Commission Concerted Action Programme. *FAIR CT 97-3233.*, 4p.

**Gunasekaran, S**. (1999). Pulsed microwave–vacuum drying of food materials. *Drying Technology*, *17*, 395-412.

**Guo, W., Tiwari, G., Tang, J., & Wang, S.** (2008). Frequency, moisture and temperature-dependent dielectric properties of chickpea flour. *Biosystems Engineering*, *101*(2), 217-224.

**Hanna Hakim, L.** (2008). *Effet d'un chauffage micro-ondes et conventionnel sur la thermorésistance d'une Salmonelle traitée dans un produit à basse activité d'eau. Conséquences sur la qualité du produit*. Thèse AgroParisTech, Lasalle-Beauvais.

**Harnoy, A., & Radjewski, W.** (1982). Optimization of grain drying With rest-periods. *Journal of Agricultural Engineering Research Journal of Agricultural Engineering Research*, *27*(4), 291-307.

**Heistercamp M., Maes R, Mehaudens L, Robert S, & Robert S.** (2002). *L'énergie sous toutes ces formes : Les microondes*. Printemps des sciences.

**Henderson, S. M**. (1974). Progress in developing the thin layer drying equation. *Transactions of ASAC, 17*, (17), 1167–1172.

**Heredia, A., Barrera, C., & Andrés, A.** (2007). Drying of cherry tomato by a combination of different dehydration techniques. Comparison of kinetics and other related properties. *Journal of Food Engineering*, *80*(1), 111-118.

**Heredia, A., Peinado, I., Barrera, C., & Grau, A. A.** (2009). Influence of process variables on colour changes, carotenoids retention and cellular tissue alteration of cherry tomato during osmotic dehydration. *Journal of Food Composition and Analysis*, *22*(4), 285-294.

**Heredia, A., Peinado, I., Rosa, E., & Andrés, A.** (2010). Effect of osmotic pre-treatment and microwave heating on lycopene degradation and isomerization in cherry tomato. *Food Chemistry*, *123*(1), 92-98.

**Ibarz, A., Pagán, J., & Garza, S.** (1999). Kinetic models for colour changes in pear puree during heating at relatively high temperatures. *Journal of Food Engineering*, *39*(4), 415-422.

**IPGRI.** (2009). Descripteurs de la tomate (Lycopersicon spp.). International Plant Genetic Resource Institute.

**Karaaslan, S. N., & Tunçer, I. K.** (2008). Development of a drying model for combined microwave-fan-assisted convection drying of spinach. *Biosystems Engineering*, *100*(1), 44-52.

**Karathanos, V. T.** (1999). Determination of water content of dried fruits by drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, *39*(4), 337-344.

**Keijbets, M. J. H., & Pilnik, W.** (1974). Beta-Elimination of pectin in the presence of anions and cations. *Carbohydrate Research*, *33*(2), 359-362.

**Khraisheh, M. A. M., Cooper, T. J. R., & Magee, T. R. A.** (1997). Transport Mechanisms of Moisture During Air Drying Processes. *Food and Bioproducts Processing*, *75*(1), 34-40.

**Kong, K. W., & Ismail, A.** (2011). Lycopene content and lipophilic antioxidant capacity of by-products from Psidium guajava fruits produced during puree production industry. *Food and Bioproducts Processing*, *89*(1), 53-61

**Krokida, M. K., & Maroulis, Z. B.** (1999). Effect of microwave drying on some quality properties of dehydrated prodcuts. *Drying Technology*, *17*(3), 449-466.

**Le Marchand, L., Hankin, J. H., Carter, F. S., Essling, C., Luffey, D., Franke, A. A., Wilkens, L. R.** (1994). A pilot study on the use of plasma carotenoids and ascorbic acid as markers of compliance to a high fruit and vegetable dietary intervention. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention: A Publication of the American Association for Cancer Research, Cosponsored by the American Society of Preventive Oncology*, *3*(3), 245-251.

**Lecharpentier, D.** (2000). *Optimisation d'un procédé de séchage. Problématiques liées au transfert de masse et de chaleur lors de l'utilisation de technologies rayonnantes microondes et infrarouge* (Thèse de doctorat). Universités de Nantes.

**Li, Z, Raghavan, G. S. V., & Orsat, V.** (2010a). Temperature and power control in microwave drying. *Journal of Food Engineering*, *97*(4), 478-483.

**Li, Z., Raghavan, G. S. V., & Orsat, V.** (2010b). Optimal power control strategies in microwave drying. *Journal of Food Engineering*, *99*(3), 263-268.

**Li, Z, Raghavan, G. S. V., & Wang, N.** (2010). Carrot volatiles monitoring and control in microwave drying. *LWT - Food Science and Technology*, *43*(2), 291-297.

**Lin, T. M., D. Durance, T., & Scaman, C. H.** (1998). Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. *Food Research International*, *31*(2), 111-117.

**Linden, G., & Lorient, D.** (1994). *Biochimie agro-industrielle : valorisation alimentaire de la production agricole*. Paris -Milan-Barcelone: Masson.

**Liu, Q., Suzuki, K., Nakaji, S., & Sugawara, K.** (2000). Antioxidant activities of natural 9-cis and synthetic all-trans Î²-carotene assessed by human neutrophil chemiluminescence. *Nutrition Research*, *20*(1), 5-14.

**Lombraña, J. I., Rodríguez, R., & Ruiz, U.** (2010). Microwave-drying of sliced mushroom. Analysis of temperature control and pressure. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *11*(4), 652-660.

**Lovrić, T., Sablek, Z., & Bošković, M.** (1970). Cis-trans isomerisation of lycopene and colour stability of foam—mat dried tomato powder during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *21*(12), 641-647.

**Lozano, J. E., & Ibarz, A.** (1997). Colour changes in concentrated fruit pulp during heating at high temperatures. *Journal of Food Engineering*, *31*(3), 365-373.

**Lu, L., Tang, J., & Liang, L.** (1998). Moisture distribution in spherical foods in microwave drying. *Drying Technology*, *16*(3-5), 503-524.

**Lu, L., Tang, J., & Ran, X.** (1999). Temperature and moisture changes during microwave drying of sliced food. *Drying Technology*, *17*(3), 414-431.

**Luangmalawat, P., Prachayawarakorn, S., Nathakaranakule, A., & Soponronnarit, S.** (2008). Effect of temperature on drying characteristics and quality of cooked rice. *LWT - Food Science and Technology*, *41*(4), 716-723.

**Luna-Guzman, I., & Barrett, D. M.** (2000). Comparison of calcium chloride and calcium lactate effectiveness in maintaining shelf stability and quality of fresh-cut cantaloupes. *Postharvest Biology and Technology*, *19*(1), 61-72.

**MacDougall, D. B.** (2002). *Colour in food: improving quality*. Woodhead Publishing. Cambridge, England.378p.

**Markovic, K., Hruskar, M., & Vahcic, N.** (2006). Lycopene content of tomato products and their contribution to the lycopene intake of Croatians. *Nutrition Research*, *26*(11), 556-560.

**Maskan, M.** (2000). Microwave/air and microwave finish drying of banana. *Journal of Food Engineering*, *44*(2), 71-78.

**Maskan, M.** (2001). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, *48*(2), 169-175.

**Mathey, C., & Baissard, D.** (2009). La tomate, légume de tous les pays. Le journal en ligne de Saint-Benigne. *http://www.01-saintbenigne.info/article-la-tomate-legume-de-tous-les-pays-38441391.html*. Consulté le 8 avril, 2008.

**Mayer-Miebach, E., Behsnilian, D., Regier, M., & Schuchmann, H. P.** (2005). Thermal processing of carrots: Lycopene stability and isomerisation with regard to antioxidant potential. *Food Research International*, *38*(8-9), 1103-1108.

**McLoughlin, C. M., McMinn, W. A. M., & Magee, T. R. A.** (2005). Microwave–convective drying characteristics of pharmaceutical powders. *Powder Technology*, *153*(1), 23-33.

**McMinn, W. A. M.** (2006). Thin-layer modelling of the convective, microwave, microwave-convective and microwave-vacuum drying of lactose powder. *Journal of Food Engineering*, *72*(2), 113-123.

**Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z.** (2002). A new model for singlelayer drying. *Drying Technology*, *20*(7), 1503-1513.

**Minolta KONIKA.** (2003). Analyse des couleurs parlons, clair : de l'appréciation visuelles de la couleur à la mesure par l'instrument. The essentials of imaging.

**Morineau, A., & Chatelin, Y.-M.** (2005). *L'analyse statistique des données : Apprendre, comprendre et réaliser avec Excel*. Ellipses Marketing.

**Mudgett, R. E.** (1986). Microwave properties and heating characteristics of foods. *Food Technology*, p. v. 40(6) p. 84-93, 98. USA.

**Mujumdar, A., S.** (1995). *Handbook of Industrial Drying: v. 2*. Marcel Dekker Inc.New York, 730p.

**Nadeau, J.-P., & Puiggali, J.-R.** (1995). *Séchage : des processus physiques aux procédés industriels*. Londres ;Paris ;New York: Tec & Doc Lavoisier.307 p.

**Nguyen, M. L., & Schwartz, S. J.** (1998). Lycopene stability during food processing. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine. Society for Experimental Biology and Medicine (New York, N.Y.)*, *218*(2), 101-105.

**Nijhuis, H. , Torringa, H. , Muresan, S., Yuksel, D., Leguijt, C., & Kloek, W.** (1998). Approaches to improving the quality of dried fruit and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, *9*(1), 13-20.

**Noble, A. C.** (1975). Investigation of the Color changes in heat concentrated tomato pulp. *J. Agric. Food Chem. Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *23*(1), 48-49.

**Orsat, V., Changrue, V., & Raghavan, G. S. V.** (2006). Microwave drying of fruits and vegetables. *Stewart Postharvest Review*, *2*(6), 1-7.

**Özbek, B., & Dadali, G.** (2007). Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. *Journal of Food Engineering*, *83*(4), 541-549.

**Pereira, N. R., Marsaioli, Jr. A., & Ahrné, L. M.** (2007). Effect of microwave power, air velocity and temperature on the final drying of osmotically dehydrated bananas. *Journal of Food Engineering*, *81*(1), 79-87.

**Perkin, R. M.** (1980). The heat and mass transfer characteristics of boiling point drying using radio frequency and microwave electromagnetic fields. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *23*(5), 687-695.

**Pinard, M.** (2009). Programmation graphique des applications de contrôle-commande - Notions générales et langage G. *Sciences et Techniques de l'ingénieur.*, *Référence S8205*.

**Poisson, D., De la Porte C, & Rio C.** (2009). Alimentation santé et petit budget : la densité nutritionnelle des aliments. *Revue CERIN*, (46), 8p.

**Prachayawarakorn, S., Tia, W., Plyto, N., & Soponronnarit, S.** (2008). Drying kinetics and quality attributes of low-fat banana slices dried at high temperature. *Journal of Food Engineering*, *85*(4), 509-517.

**Raghavan, G S V, Orsat, V., & Meda, V.** (2005). Microwave processing of foods. *Stewart Postharvest Review*, *1*(2), 1-8.

**Rajchl, A., Voldrich, M., Cizkova, H., Hronova, M., Sevcík, R., Dobias, J., & Pivonka, J.** (2010). Stability of nutritionally important compounds and shelf life prediction of tomato ketchup. *Journal of Food Engineering*, *99*(4), 465-470.

**Rao, A.V., & Agarwal, S.** (1999). Role of lycopene as antioxidant carotenoid in the prevention of chronic diseases: A review. *Nutrition Research*, *19*(2), 305-323.

**René, F., & Marin, M**. (2000). Base documentaire Agroalimentaire: Lyophilisation. *Techniques de l'ingénieur*, (Référence F3240).

**Rodrigo, D., van Loey, A., & Hendrickx, M.** (2007). Combined thermal and high pressure colour degradation of tomato puree and strawberry juice. *Journal of Food Engineering*, *79*(2), 553-560.

**Rougier C**. (2003). *Etude des interactions entre la bactérie Escherichia coli et les microondes appliquées en mode discontinu dans des conditions faiblement thermiques.* Thèse de Université de Limoges.

**Rozis, J.-F.** (1995). *Sécher des produits alimentaires : techniques, procédés, équipements, guide technique*. Paris ;Wageningen Pays-Bas : GRET ; Ministère de la Coopération ; CTA ;

**Sacilik, K., Keskin, R., & Elicin, A. K.** (2006). Mathematical modelling of solar tunnel drying of thin layer organic tomato. *Journal of Food Engineering*, *73*(3), 231-238.

**Sajjaanantakul, T., Van Buren, J. P., & Downing, D. L.** (1993). Effect of cations on heat degradation of chelator-soluble carrot pectin. *Carbohydrate Polymers*, *20*(3), 207-214.

**Salunkhe, D. K., Bolin, H. R., & Reddy, N. R.** (1974). *Storage, processing, and nutritional quality of fruits and vegetables.* Cleveland: CRC Press.

**Sanga, E. C. M., Mujumdar, A. S., & Raghavan, G. S. V.** (2002). Simulation of convection-microwave drying for a shrinking material. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *41*(6), 487-499.

**Scaman, C. H., & Durance, T. D.** (2005). Combined Microwave Vacuuum-drying. *Emerging Technologies for Food Processing* (p. 507-533). London: Academic Press.

**Sharma, G., & Prasad, S.** (2004). Effective moisture diffusivity of garlic cloves undergoing microwave-convective drying. *Journal of Food Engineering*, *65*(4), 609-617.

**Sharma, G. P., & Prasad, S**. (2006a). Optimization of process parameters for microwave drying of garlic cloves. *Journal of Food Engineering*, *75*(4), 441-446.

**Sharma, G. P., & Prasad, S.** (2006b). Specific energy consumption in microwave drying of garlic cloves. *Energy*, *31*(12), 1921-1926.

**Shi, J, & Le Maguer, M.** (2000). Lycopene in tomatoes: chemical and physical properties affected by food processing. *Critical Reviews in Biotechnology*, *20*(4), 293-334.

**Shi, J., Maguer, M. L., Kakuda, Y., Liptay, A., & Niekamp, F.** (1999). Lycopene degradation and isomerization in tomato dehydration. *Food Research International*, *32*(1), 15-21.

**Shivhare, U. S., Raghavan, G. S. V., & Bosisio, R. G.** (1992). Microwave drying of corn I: Equilibrium moisture content. *Transactions of ASAE,*, *35*(3), 947-950.

**Shivhare, U. S., Raghavan, G. S. V., Bosisio, R. G., & Mujumdar, A. S.** (1992). Microwave drying of corn III. Constant power, intermittent operation. *Transactions of the ASAE*, *35*(3), 959–962.

**Sila, D. N., Smout, C., Elliot, F., Loey, A. V., & Hendrickx, M.** (2006). Non-enzymatic Depolymerization of Carrot Pectin: Toward a Better Understanding of Carrot Texture During Thermal Processing. *Journal of Food Science*, *71*(1), 1-9.

**Singh, R. P., & Heldman, D. R.** (2001). *Introduction to Food Engineering, Third Edition*. London UK: Academic Press.

**Sosa-Morales, M. E., Tiwari, G., Wang, S., Tang, J., Garcia, H. S., & Lopez-Malo, A.** (2009). Dielectric heating as a potential post-harvest treatment of disinfesting mangoes, Part I: Relation between dielectric properties and ripening. *Biosystems Engineering*, *103*(3), 297-303.

**Sosa-Morales, M. E., Valerio-Junco, L., Lopez-Malo, A., & Garcia, H. S.** (2010). Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st Century and their potential applications. *LWT - Food Science and Technology*, *43*(8), 1169-1179.

**Soysal, Y., Ayhan, Z., Estürk, O., & Arikan, M. F.** (2009). Intermittent microwave convective drying of red pepper: Drying kinetics, physical (colour and texture) and sensory quality. *Biosystems Engineering*, *103*(4), 455-463.

**Soysal, Y., Oztekin, S., & Eren, O.** (2006). Microwave Drying of Parsley: Modelling, Kinetics, and Energy Aspects. *Biosystems Engineering*, *93*(4), 403-413.

**Stahl, W, Heinrich, U., Jungmann, H., Sies, H., & Tronnier, H.** (2000). Carotenoids and carotenoids plus vitamin E protect against ultraviolet light-induced erythema in humans. *The American journal of clinical nutrition*, *71*(3), 795-798.

**Stahl, W. & Sies, H.** (1996). Lycopene: A Biologically Important Carotenoid for Humans? *Archives of Biochemistry and Biophysics*, *336*(1), 1-9.

**Steptoe, A., Perkins-Porras, L., McKay, C., Rink, E., Hilton, S., & Cappuccio, F. P.** (2003). Behavioural counselling to increase consumption of fruit and vegetables in low income adults: randomised trial. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, *326*(7394), 855-858.

**Strumillo, C.** (1986). *Drying: Principles, Applications and Design* (1er éd.). Routledge.

**Tao, Z., Wu, H., Chen, G., & Deng, H.** (2005). Numerical simulation of conjugate heat and mass transfer process within cylindrical porous media with cylindrical dielectric cores in microwave freeze-drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *48*(3-4), 561-572.

**Therdthai, N., & Zhou, W.** (2009). Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (Mentha cordifolia Opiz ex Fresen). *Journal of Food Engineering*, *91*(3), 482-489.

**Thuéry, J.** (1989). *Les Micro-ondes et leurs effets sur la matière: applications industrielles, agro-alimentaires et médicales*. C.D.I.U.P.A. Paris Massy: Technique et documentation -Lavoisier.

**Tonucci, L. H., Holden, J. M., Beecher, G. R., Khachik, F., Davis, C. S., & Mulokozi, G**. (1995). Carotenoid Content of Thermally Processed Tomato-Based Food Products. *J. Agric. Food Chem.*, *43*(3), 579-586.

**Toor, R. K., & Savage, G. P.** (2005). Antioxidant activity in different fractions of tomatoes. *Food Research International*, *38*(5), 487-494.

**Torringa, E., Esveld, E., Scheewe, I., van den Berg, R., & Bartels, P.** (2001). Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms. *Journal of Food Engineering*, *49*(2-3), 185-191.

**Tu, K., Nicolai, B., & De Baerdemaeker, J.** (2000). Effects of relative humidity on apple quality under simulated shelf temperature storage. *Scientia Horticulturae*, *85*(3), 217-229.

**Tulasidas, T. N., Raghavan, G. S. V., & Mujumdar, A. S.** (1995). Microwave Drying of Grapes in a Single Mode Cavity at 2450 Mhz - 11: Quality and Energy Aspects. *Drying Technology*, *13*, 1973-1992.

**Tulasidas, T. N., Raghavan, G. S. V., & Norris, E. R**. (1993). Microwave and convective drying of grapes. *Transactions of ASAE*, *36*(6), 1861–1865.

**Vadivambal, R., & Jayas, D. S.** (2007). Changes in quality of microwave-treated agricultural products-a review. *Biosystems Engineering*, *98*(1), 1-16.

**Venkatesh, M. S., & Raghavan, G. S. V.** (2004). An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties of Agri-food Materials. *Biosystems Engineering*, *88*(1), 1-18.

**Wang, S., Monzon, M., Gazit, Y., Tang, J., Mitcham, E. J., & Armstrong, J. W.** (2005). Temperature-dependent dielectric properties of selected subtropical andtropical fruit and associated insect pests. *Transactions of the ASAE*, 48(5), 1873-1881.

**Wang, S., Tang, J., Johnson, J. A., Mitcham, E., Hansen, J. D., Hallman, G., Drake, S. R.** (2003). Dielectric Properties of Fruits and Insect Pests as related to Radio Frequency and Microwave Treatments. *Biosystems Engineering*, *85*(2), 201-212.

**Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X., & Hu, X.** (2007). Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. *Journal of Food Engineering*, *80*(2), 536-544.

**Yagcioglu, A., Degirmencioglu, A., & Cagatay, F.** (1999). Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. *Proceedings of the 7th International Congress on Agricultural Mechanisation and Energy*, 565–569.

**Yaldyz, O., & Ertekin, C.** (2001). Thin layer solar drying of some vegetables. *Drying Technology*, *19*(3), 583-597.

**Zagrouba, F.** (1993). *Séchage mixte par convection et un apport rayonnant micro-onde des milieux déformables. Modélisation des phénomènes de transferts de chaleur et de matière*. Thèse de Institut national polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy, France.

**Zamblé, F.** (2010). Côte d'Ivoire - Le recours aux nouvelles techniques agricoles. *http://ipsinternational.org/fr/_note.asp?idnews=6328*. Consulté le 28 juillet, 2011.

**Zechmeister, L., LeRosen, A. L., Schroeder, W. A., Polgár, A., & Pauling, L**. (1943). Spectral Characteristics and Configuration of Some Stereoisomeric Carotenoids Including Prolycopene and Pro-γ-carotene. *J. Am. Chem. Soc.*, *65*(10), 1940-1951.

**Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A. S., & Wang, S.** (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, *17*(10), 524-534.

**Zidani, S.** (2009). *Valorisation des pelures de tomates séchées en vue de leur incorporation dans la margarine* (Mémoire de magister). Faculté des Sciences de l'Ingénieur. Algérie: Université M'hamed Bougara-Boumerdes.

**Zino, S., Skeaff, M., Williams, S., & Mann, J.** (1997). Randomised controlled trial of effect of fruit and vegetable consumption on plasma concentrations of lipids and antioxidants. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, *314*(7097), 1787-1791.

**Zogzas, N. P., Maroulis, Z. B., & Marinos-Kouris, D.** (1996). Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs. *Drying Technology*, *14*, 2225-2253.

# ANNEXES

# LISTE DES ANNEXES

**ANNEXE I-**Tableau des propriétés diélectriques de quelques fruits et légumes ..... 171
**ANNEXE II** -Etalonnage et vérification des appareils de mesures..... 172
**ANNEXE III**-Détermination de la teneur en lycopène par spectrophotométrie UV-Visible. 180
**ANNEXE IV**-Caractérisation du séchage MOAC avec régulation de la puissance spécifique en continue a différentes conditions de séchage..... 181
**ANNEXE V**- Caractéristiques des courbes de cinétiques et vitesses de séchage du mode 2 (régulation par intermittence) ..... 190
**ANNEXE VI** -Comparaison de la texture des deux modes de séchage aux puissances spécifiques de 3,5 et 7 W/g et à la température de 30 et 50°C ..... 193
**ANNEXE VII** -Evolution du logarithme de la teneur en eau réduite en fonction du temps aux puissances spécifiques de 3,5 et 7 W/g et à la température de 30 et 50°C..... 193
**ANNEXE VIII**- Analyse de la variance des modèles pour l'optimisation ..... 194
**ANNEXE IX**- Validation des conditions optimales obtenues au cours du séchage MOAC en utilisant les méthodes des surfaces de réponses (RSM) classique et la méthode CORICO ..... 196
**ANNEXE X**- Présentation de quelques interactions logiques des modèles CORICO ..... 197

## ANNEXE I-Tableau des propriétés diélectriques de quelques fruits et légumes (Sosa-Morales et al., 2010)

| Fruits ou légumes | Température (°C) | T.E (% b.h) | Constante diélectrique ε' Fréquence | | Facteur de perte ε'' Fréquence | | Référence |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 27,12 MHz | 915 MHz | 27,12 MHz | 915 MHz | |
| Pomme (C. Or) | 20 | -- | 72,5 | 74,3 | 120,4 | 8,5 | Wang, Tang, Johnson, et al. (2003) |
| | 50 | -- | 68,1 | 67,8 | 202,2 | 8,3 | |
| Pomme (C. Rouge ) | 20 | -- | 74,6 | 77,0 | 92,0 | 10,0 | Wang, Tang, Johnson, et al. (2003) |
| | 50 | -- | 68,7 | 68,9 | 153,8 | 9,8 | |
| Avocat | 20 | -- | 115,7 | 59,9 | 699,6 | 27,4 | Wang et al. (2005) |
| | 50 | -- | 137,9 | 57,9 | 1136,2 | 39,8 | |
| Banane | 23 | 78 | -- | 64,0 | -- | 19,0 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Melon cantaloup | 23 | 92 | -- | 68,0 | -- | 14,0 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Carotte | 23 | 87 | -- | 59,0 | -- | 18,0 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Chérimolier | 20 | -- | 71,5 | 59,0 | 238,5 | 25,4 | Wang et al. (2005) |
| | 50 | -- | 72,0 | 57,5 | 406,4 | 29,1 | |
| Cerise | 20 | -- | 91,2 | 73,7 | 293,0 | 16,4 | Wang, Tang, et al. (2003) |
| | 50 | -- | 89,6 | 66,7 | 501,0 | 19,3 | |
| Concombre | 23 | 97 | -- | 71 | -- | 11 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Raisin | 23 | 82 | -- | 69 | -- | 15 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Pamplemousse | 20 | -- | 89 | 72,7 | 202,4 | 12,1 | Wang, Tang, et al. (2003) |
| | 50 | -- | 93,8 | 66,1 | 345,3 | 14,2 | |
| Kiwi | -- | 87 | -- | 70 | -- | 18 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Citron | -- | 91 | -- | 73 | -- | 15 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Chaux | -- | 90 | -- | 72 | -- | 18 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Longane | 20 | -- | 75,2 | 68,2 | 230,1 | 13,3 | Wang et al. (2005) |
| | 50 | -- | 69,7 | 60,8 | 377,7 | 15 | |
| Mangue | -- | 86 | -- | 64 | -- | 13 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Mangue 'Arkins' | 20 | 86 | 83,1 | 74 | 250,1 | 13,8 | Sosa-Morales et al. (2009) |
| | 50 | | 79,8 | 67,3 | 404,6 | 16,0 | |
| Oignon | -- | 92 | -- | 61 | -- | 12 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Orange | 20 | -- | 84 | 72,9 | 223,3 | 16,5 | Wang, Tang, et al. (2003) |
| | 50 | -- | 78 | 66,1 | 367,7 | 17,5 | |
| Papaye | -- | 88 | -- | 69 | -- | 10 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Passion fruit | 20 | -- | 82,7 | 59,7 | 264,1 | 15 | Wang et al. (2005) |
| | 50 | -- | 91,6 | 55,5 | 441,2 | 17,6 | |
| Pêche fruit | -- | 90 | -- | 70 | -- | 12 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Poire | -- | 84 | -- | 67 | -- | 11 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Kaki | 20 | -- | 79,8 | 68,4 | 207,5 | 21,1 | Wang et al. (2005) |
| | 50 | -- | 76,6 | 68,5 | 346,4 | 16,1 | |
| Patate | -- | 79 | -- | 62 | -- | 22 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Radis | -- | 96 | -- | 68 | -- | 20 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Courge | -- | 95 | -- | 63 | -- | 15 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Fraise | -- | 92 | -- | 73 | -- | 14 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Patate douce | -- | 80 | -- | 55 | -- | 16 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Navet | -- | 92 | -- | 63 | -- | 13 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| Pomme mexicaine | 20 | -- | 76 | 62,6 | 258,6 | 24 | Venkatesh and Raghavan (2004) |
| | 50 | -- | 74,5 | 60,3 | 433,1 | 24,9 | |

TE = teneur en eau ; bh = base humide ;

# ANNEXE II -Etalonnage et vérification des appareils de mesures

### 2.1- FIBRES OPTIQUES POUR LA MESURE DE LA TEMPERATURE DU PRODUIT

#### 2.1.1- Protocole expérimental

La fibre optique, utilisée pour la mesure de la température des produits, est successivement plongée dans un bécher (de 500 mL) contenant un mélange d'eau distillée et de glace pilée (faite à l'eau distillée), puis dans une casserole (d'environ 1000 mL) contenant de l'eau distillée bouillante (posée sur une plaque chauffante). A chaque répétition (au nombre de 5), l'on vérifie qu'on a respectivement 0,0 ± 0,5°C et 100,0 ± 0,5°C (voir certificat de calibration en annexe A) sur la centrale Neoptix (centrale d'acquisition de la température du produit par les fibres optiques). La tension à la sortie du Neoptix est envoyée sur une centrale d'acquisition NI DAQ (National Instrument) reliée à un ordinateur utilisant un programme de supervision LabView (National Instrument) permettant d'établir la relation entre la tension *U* (en V) et température $\theta$ (en °C) mesurée entre 0 et 100°C : $\theta = f(U)$ .

#### 2.1.2- Résultats

L'ensemble des valeurs des températures lues sur l'affichage de la centrale Neoptix lorsque la fibre est introduite respectivement dans le bain d'eau glacée et dans l'eau distillée bouillante, est résumé dans le tableau 2.1 ci-dessous.

**Tableau 2.1-** *Valeurs des températures mesurées par fibre optique dans un bain d'eau glacée et dans de l'eau bouillante*

| **Affichage centrale Neoptix** | | **Tension sortie analogique Neoptix** | |
|---|---|---|---|
| Température (°C) eau+glace pilée | Température eau bouillante (°C) | Tension (V) sortie analogique à 0°C | Tension (V) sortie analogique à 100°C |
| 0,02 | 100,07 | 0,001 | 5,00 |
| 0,01 | 100,15 | 0,001 | 5,00 |
| 0,03 | 100,08 | 0,002 | 5,00 |
| 0,01 | 100,05 | 0,001 | 5,00 |
| 0,03 | 100,06 | 0,002 | 5,01 |
| **0,02 ± 0,01** | **100, 08 ± 0,04** | **0,001 ± 0,000** | **5,004 ± 0,002** |

La centrale Neoptix affiche des températures qui sont converties en tensions au niveau de sa sortie analogique. De ce fait, la relation obtenue entre la sortie tension du Neoptix et la température affichée à cette dernière est la suivante :

$$\theta = 20.U \qquad \text{(A1.1)}$$

avec U, la tension mesurée en sortie du Neoptix (en V) et $\theta$, la température mesurée par les fibres optiques (en °C).

### 2.2.2- THERMOCOUPLES

#### 2.2.2.1- Protocole expérimental

Deux thermocouples (de type K) situés à l'entrée et à la sortie du piège à eau du pilote microondes sont montés en opposition de phase et branché sur le châssis d'acquisition (National Instrument NIc DAQ-9178) afin de donner directement une différentielle de température. Le châssis d'acquisition est relié à un PC sur port USB.
Les deux thermocouples sont plongés simultanément dans le même bécher de 500 mL contenant le mélange d'eau distillée et de glace pilée (faite à l'eau distillée) ou dans une casserole (d'environ 1000 mL) d'eau distillée bouillante, pour vérifier le 0°C. Puis ils sont simultanément plongés mais séparément cette fois dans les deux

bains précédents pour vérifier les 100°C ; ensuite on inverse les thermocouples au niveau des récipients expérimentaux qui restent donc toujours à 0 et 100°C.
Les tensions aux sorties analogiques, où sont branchés les thermocouples, sont enregistrées sur un PC. L'enregistrement est réalisé sur 60 secondes à raison d'une donnée par seconde et la relation tension – température est alors établie.

### 2.2.2.2- Résultats

Les données enregistrées permettent de tracer la courbe évolutive (figure 2.1) de la différence de température obtenue des deux bains d'eau distillée (eau glacée et eau bouillante) en fonction du temps.

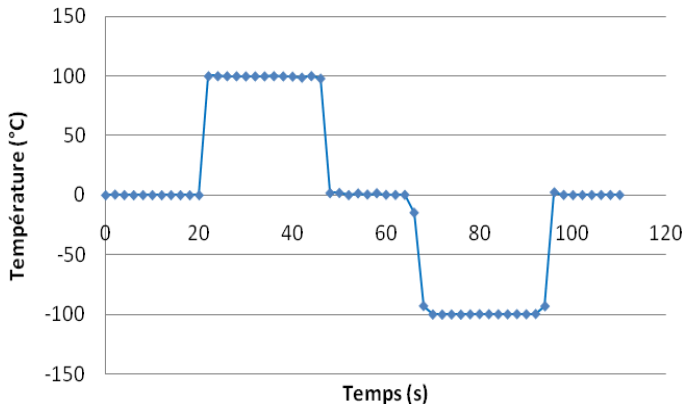



**Figure 2.1 -** *Vérification du 0°C et des 100 °C au niveau des thermocouples montées en opposition de phase.*

Cette figure 2.1 montre qu'on arrive à réaliser le 0 et les 100°C avec les deux thermocouples de type K, indiquant ainsi qu'ils sont bien étalonnés.
Les tensions issues des sorties analogiques (branchées aux thermocouples) de la centrale NI sont enregistrées par le PC. Les données intermédiaires de températures obtenues grâce à l'eau glycolée dans un bac, ont permis d'avoir les résultats présentés à la figure 2.2.

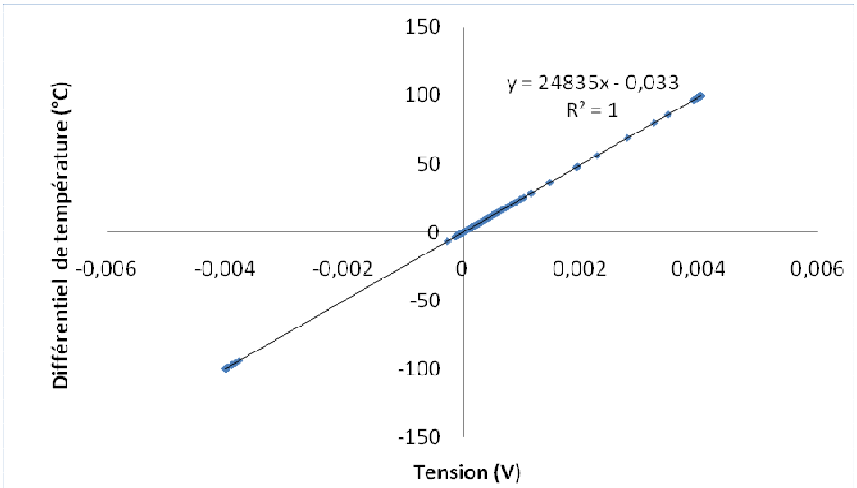



**Figure 2.2-** *Etalonnage des thermocouples montés en opposition de phase*

On obtient donc la relation de l'équation 2.8 entre la différentielle de température et la tension :

$$\Delta\theta = 24{,}835U - 0{,}033 \qquad \text{(A1.2)}$$

### 2.2.3- DEBITMETRE

#### 2.2.3.1 –Protocole expérimental

Pour *l'étalonnage*, on dispose d'un débitmètre électromagnétique (KOBOLD- 2047098) (de sensibilité comprise entre 0,05 -1,48 L/min et de précision ±2%) avec un affichage et une sortie courant (4-20 mA) reliée à la centrale NI cDAQ. Ce courant est enregistré sur PC par le biais du logiciel LabView. Le débitmètre est relié au piège à eau du pilote et l'ouverture de la vanne d'eau qui permet de faire une régulation du débit. Une relation a été établie entre le courant enregistré (en mA) et celle du débitmètre KOBOLD ; c'est cette relation a été utilisée pour l'étalonnage du débitmètre.
Pour la *calibration*, une mesure expérimentale du débit a été réalisée à l'aide d'une éprouvette graduée de 1000 ± 7,5 mL et d'un chronomètre. Quatre niveaux de durée de mesure du débit expérimental ont été réalisés en maintenant presque constant le volume d'eau recueillie à 1000 mL; et pour chaque niveau de la durée, 3 répétitions ont été réalisées. Cela a été possible en faisant varier le débit de l'eau au niveau de la vanne d'ouverture et de fermeture. Ce débit est comparé à celui du débitmètre KOBOLD pris comme référence.

#### 1.2.3.2 –Résultats

Pour l'étalonnage du débitmètre, les données du courant en mA enregistrées à la sortie analogique du débitmètre par le PC et celles du débit (L/min) lues sur l'affichage du débitmètre KOBOLD sont présenté dans le tableau 2.2. Ces données permettent ainsi déterminer le débit de l'eau (au niveau du piège à eau) à partir du courant (à la sortie analogique du débitmètre) par la relation :

$$D = 0{,}0625I - 0{,}248 \qquad \text{(A1.3)}$$

**Tableau 2.2-** *Relation courant à la sortie analogique du débitmètre KOBOLD et débit au niveau du piège à eau.*

| Intensité du courant (mA) | Affichage débitmètre (L/min) |
|---|---|
| 4,000 | 0,00 |
| 7,091 | 0,19 |
| 12,011 | 0,50 |
| 15,878 | 0,74 |
| 16,963 | 0,81 |
| 20,000 | 1,00 |

Les résultats de la calibration sont présentés à la figure 2.3. On compare les résultats obtenus expérimentalement avec l'éprouvette graduée et le débit de référence du débitmètre électromagnétique (KOBOLB- 2047098). Cette figure montre qu'il ya bien une similitude entre les résultats donnés par le débitmètre de référence et ceux donnés par le débitmètre expérimental (éprouvette graduée plus chronomètre) avec un coefficient de détermination proche de l'unité ($R^2 = 0{,}9999$). On peut donc dire que le débitmètre électromagnétique est bien calibré.

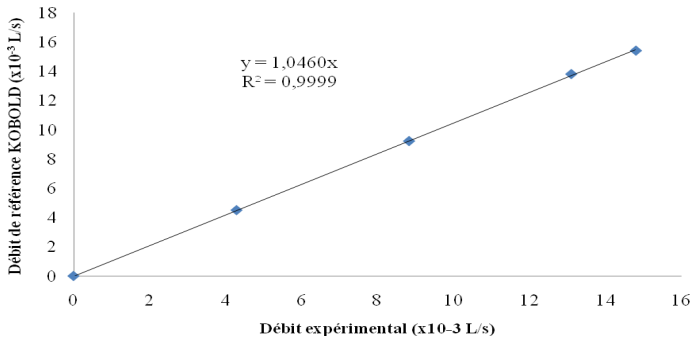



**Figure 2.3-** *Calibration du débitmètre électromagnétique KOBOLD*

### 2.2.4- WATTMETRES

#### 2.2.4.1 –Protocole expérimental

La tension, à la sortie analogique, des deux wattmètres est mesurée (entre 0 et 1,0V) et enregistrée sur le PC. L'enregistrement des tensions s'est fait sur 100 secondes à raison d'une donnée pat seconde. Une lecture de la puissance correspondante a été faite directement sur l'écran des wattmètres 1 et 2 (qui doivent servir respectivement à la mesure de la puissance incidente et réfléchie sur le pilote). Des relations sont établies entre la tension de sortie et les puissances lues sur les wattmètres. Elles sont intégrées dans le VI de LabView afin d'avoir une bonne correspondance entre les puissances des wattmètres et celles affichées par le PC.

#### 2.2.4.2- Résultats

La figure 2.4 représente la courbe d'étalonnage des puissances des wattmètres. Les points représentés sont des moyennes de 100 données.

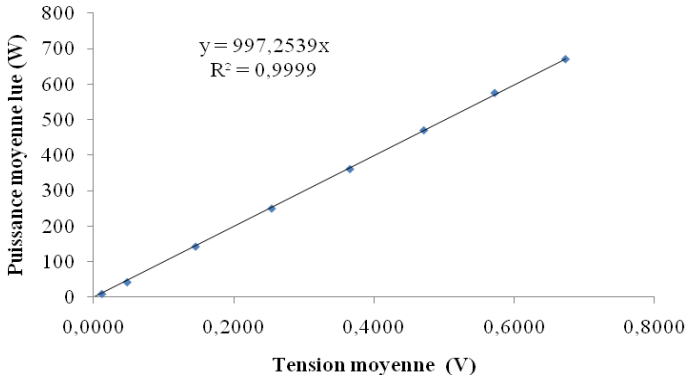



**Figure 2.4-** *Etalonnage entre les sorties en tensions et les puissances incidentes et réfléchies*

La relation trouvée : $P = 997{,}25U$ est intégrée dans le VI pour les 2 puissances des wattmètres avec pour objectif de calibrer les wattmètres. Après intégration de cette relation dans le VI, l'expérience est reconduite et on enregistre les puisssances des wattmètres obtient les courbes de validation (figures 2.5-2.6).

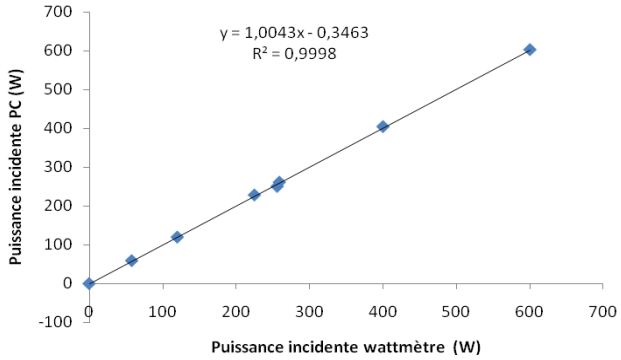



**Figure 2.5-** *Validation des mesures entre les puissances incidentes lues sur le wattmètre et celles lues sur le PC.*

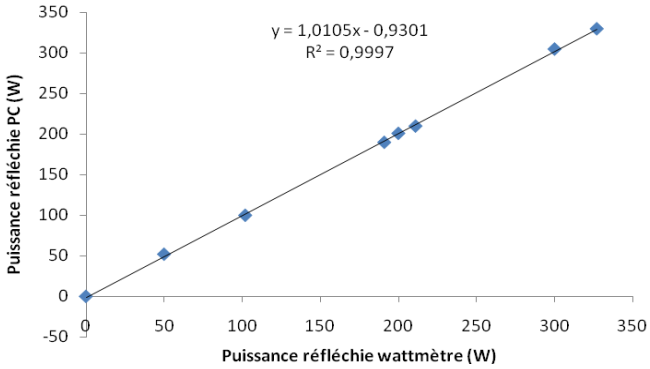



**Figure 2.6**- *Validation des mesures entre les puissances réfléchies lues sur le wattmètre et celles lues sur le PC.*

### 2.2.5- COMMANDE DE PUISSANCE DU GENERATEUR

Ces figures montrent que les puissances lues sur l'affichage des wattmètres pour puissances incidentes et réfléchies sont en accord avec celles enregistrées au niveau du PC avec un $R^2$ respectif de 0,9998 et 0,9997. Nous avons donc une bonne calibration des wattmètres.

Les coupleurs directifs et les wattmètres sont installés sur le pilote et reliés à la centrale pour acquisition de la puissance appliquée ou incidente ($P_{ap}$) et réfléchie ($P_{ref}$). La puissance absorbée ($P_{ab}$) est alors déduite par la relation : $P_{ab} = P_{ap} - P_{ref}$

#### 2.2.5.1-Protocole expérimental

Pour réaliser cette commande, on envoie à partir du logiciel LabView (sur PC) une tension et on note la puissance appliquée réelle. Cela permet de savoir quelle est la tension a envoyer au générateur pour la commande de la puissance appliquée souhaitée.

Cette dernière étant obtenue grasse à la masse qu'on enregistre sur le VI de la face d'acquisition du pilote que multiplie la puissance spécifique à appliquer qui est aussi enregistrée. Ainsi la puissance appliquée voulue sera transformée en tension et envoyée au générateur (grâce à la relation de la tension de commande en fonction de la puissance appliquée qu'on aura trouvée).

#### 2.2.5.2-Résultats

La figure 2.7 donne la relation entre la puissance réelle appliquée et la tension de commande.

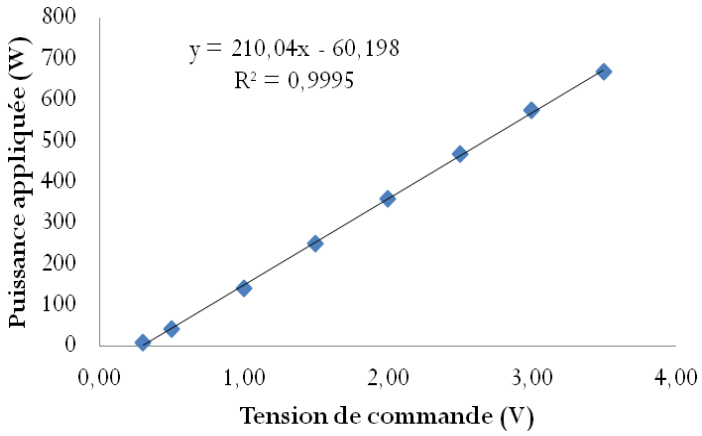



**Figure 2.7**- *Evolution de la puissance appliquée en fonction de la tension de commande.*

La relation $P = 210{,}04U - 60{,}20$ est entrée dans le VI et permet de fixer la puissance appliquée souhaitée issue de la relation $P_{ap} = P_s.m_p$ avec $P_s$ la puissance spécifique à appliquer et $m_p$ la masse du produit.

### 2.2.6 - PESEE DE L'ECHANTILLON AU COURS DU SECHAGE

#### 2.2.6.1 –Protocole expérimental

Deux objets inertes de masses $M_1$ (66,14 g) et $M_2$ (4,85 g) ont été utilisés : un objet parallélépipédique en téflon (40x35x20 mm) et un autre en polypropylène cylindrique (41x14 mm). La mesure de la masse réelle des objets inertes est faite à l'aide d'une balance électronique (SARTORIUS MC 410S) de précision ±0,0001g. Par ailleurs, une autre balance électronique (SARTORIUS CPA 62025) de précision de ±0,01 g, a été utilisée pour la réalisation de la pesée au cours du séchage sur le pilote. La balance SARTORIUS CPA 62025 placée sous le plateau est reliée à un ordinateur à l'aide d'un câble RS232 pour l'enregistrement des données grâce à LabView via des fonctions crées par Sartorius. La donnée enregistrée est ensuite comparée à la masse de l'objet mesurée par la balance de référence (SARTORIUS).

Le plateau tournant en marche avec l'air ambiant ventilé (et la cavité de séchage fermée) est taré (mise à zéro). Des essais avec mise en route des microondes (66 W) et de l'air ambiant ont été réalisés respectivement sur les

masses $M_1$ et $M_2$. La pesée est réalisée *in situ* avec une acquisition faite par seconde au niveau du PC. L'expérience est réalisée sur 5 min (soit 300 données) pour l'objet en téflon ($\varepsilon'$=2,1) et sur 3 min (soit 180 données) pour l'objet en plastique ($\varepsilon'$= 4) ; tous deux des isolants.

### 2.2.6.2 –Résultats

Les résultats des figures 2.8 et 2.9 montrent l'évolution de la masse des objets inertes (enregistrée lors des différents essais) dans le temps après application des microondes combinés à l'air convectif ambiant et le plateau tournant.

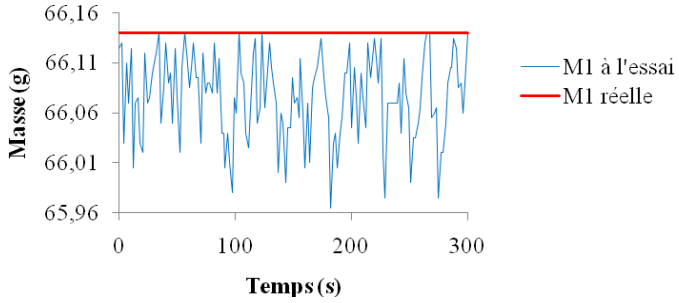



**Figure 2.8-** *Evolution de la masse inerte M1 au cours du temps in situ et "online" lors d'un essai d'application microondes combinée à l'air chaud*

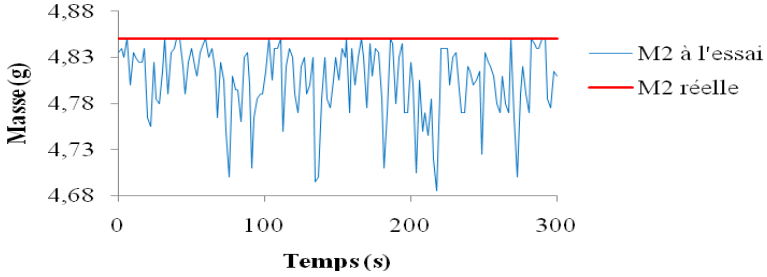



**Figure 2.9-** *Evolution de la masse inerte M2 au cours du temps in situ et "online" lors d'un essai d'application microondes combinée à l'air chaud***.**

La déviation de la masse au cours des deux essais réalisés avec les masses $M_1$ et $M_2$ sont présentées dans le tableau 2.3.

**Tableau 2.3-** *Fluctuation de la masse lors de l'essai*

| | Masse M1 | Masse M2 |
|---|---|---|
| **Ecart-type** | 0,041 | 0,039 |
| **CV (%)** | 0,063 | 0,80 |

On observe une fluctuation de masse uniquement dans le sens négatif. i.e. que les masses enregistrée sont toutes en dessous de la masse réelle. Cela s'explique part le fait qu'après que la mise à zéro de la balance (réalisée avec le plateau tournant et l'air de balayage) en début d'essai n'est pas assez stable, car la perte de masse qui doit être nulle est en dessous de zéro. Cet écart se répercute donc sur tout l'ensemble des données des essais et donne donc des masses inférieures à la masse réelle de l'objet inerte.
Cependant, cette fluctuation n'est pas assez importante pour modifier la masse réelle du produit. En effet les moyennes de l'ensemble des données des masses $M_1$ et $M_2$ à l'essai sont respectivement de 66,08 g et 4,80 g au lieu de 66,14 g et 4,85 pour les masses réelles. Avec des écart-types respectifs de 0,041 et 0,039 soit des coefficients de variations (CV) respectifs de 0,063% et 0,80% (très faibles).
**Conclusion** : Au vue de l'analyse de l'évolution de la masse des deux objets inertes dont le premier à une masse en général proche de celle de la demi-tomate initiale (55 g) et le second une masse proche de la tomate séchée (environ 4 g), on conclu que l'instabilité de la masse au cours des essais n'est pas trop prononcée. On déduit que le suivi "online" de la masse au cours du séchage par pesée *in-situ* est donc possible sans interruption de l'air.

## 2.3- VALIDATION DE LA PUISSANCE REFLECHIE A L'AIDE DU PIEGE A EAU

### 2.3.1- MESURE DE LA PUISSANCE REFLECHIE AU NIVEAU DU PIEGE A EAU

REGLAGE DU DEBIT

Sur le piège à eau du pilote microondes de laboratoire, deux thermocouples de type T ont été fixés à l'entrée et à la sortie de l'eau du piège. Ces deux thermocouples branchés en opposition de phase sont fixés à la centrale NI relié au PC. L'étalonnage des thermocouples a été réalisé au paragraphe 2.2.2 et ils permettent d'enregistrer directement la différence de température de l'eau entre la sortie et l'entrée du piège à eau.

Sachant que l'incertitude croit lorsque le débit ou l'écart de température des thermocouples décroit, alors il faut choisir un débit de sorte que l'incertitude relative du débit soit égale à celle de l'écart de température des thermocouples. Ainsi pour le débit en cL/min (sans décimale) l'incertitude de 0,5, pour la température d'un thermocouple en °C à une décimale, l'incertitude de 0,05 soit 0,1 pour l'écart de température. On pose :

$$\frac{\Delta\dot{m}}{\dot{m}} = \frac{\Delta(\Delta\theta)}{\Delta\theta} \text{ soit } \frac{0{,}5}{\dot{m}} = \frac{0{,}1}{\Delta\theta}, \text{ donne } \dot{m} = 5\Delta\theta. \qquad \text{(A1.4)}$$

Cela signifie que pour que les incertitudes relatives soient égales il faut que le débit en cL/min soit 5 fois plus grand que l'écart de température en °C. Pour cela il faut avoir une idée de la puissance réfléchie ($P_{ref}$): la posez égale à 75% de la puissance appliquée ($P_{ap}$) (suite aux essais réalisés à vide).

Cette connaissance de $P_{ref}$ permet d'avoir une idée de l'écart de température :

Sachant que $P_{ref} = \dot{m} C_p \Delta\theta$ (A1.5)

Avec $\dot{m}(cL.\min^{-1}) = \frac{10^{-2}}{60}\dot{m}(L.s^{-1})$ on a alors :

$$\frac{5}{6000}\Delta\theta.\Delta\theta = \frac{P_{ref}}{C_p} \qquad \text{(A1.6)}$$

On obtient donc le tableau ci-dessous pour les trois puissances microondes appliquées (150 W (3w/g), 250 W (5W/g), et 350 W (7W/g).

**Tableau 2.4-** *Tableau de réglage des différents débit en fonction de l'écart de température*

| Pap(W) | Pref(W) | Cp(J/kg.°C) | $\Delta\theta$ (°C) | $\dot{m}$ (cL/min) |
|---|---|---|---|---|
| 150 | 113 | 4187 | 5,7 | 28 |
| 250 | 188 | 4187 | 7,3 | 37 |
| 350 | 263 | 4187 | 8,7 | 43 |

Après réglage du débitmètre, on réalise les essais de séchage et on calcul la puissance réfléchie au niveau du piège à eau par l'équation A1.5.

### 2.3.2- MESURE DE LA PUISSANCE REFLECHIE AU NIVEAU DES WATTMETRES

A partir de l'étalonnage de la puissance réfléchie des wattmètres expliqué au paragraphe 2.2.4.1, la relation qui permet de passer de la tension (en V) à la puissance (en W), conduit à l'enregistrement direct sur le PC de la puissance réfléchie mesurée par le wattmètre.

### 2.3.3- COMPARAISON DE LA PUISSANCE REFLECHIE AU NIVEAU DU PIEGE A EAU ET DU WATTMETRE.

Les figures 2.10 à 2.12 montrent les puissances réfléchies lors des séchages respectifs à 3 W/g-50°C, 5 W/g-50°C et 7W/g-50°C. On observe une bonne corrélation entre les puissances réfléchies mesurées avec le wattmètre et celles calculées à partir du bilan énergétique réalisé sur le piège à eau.

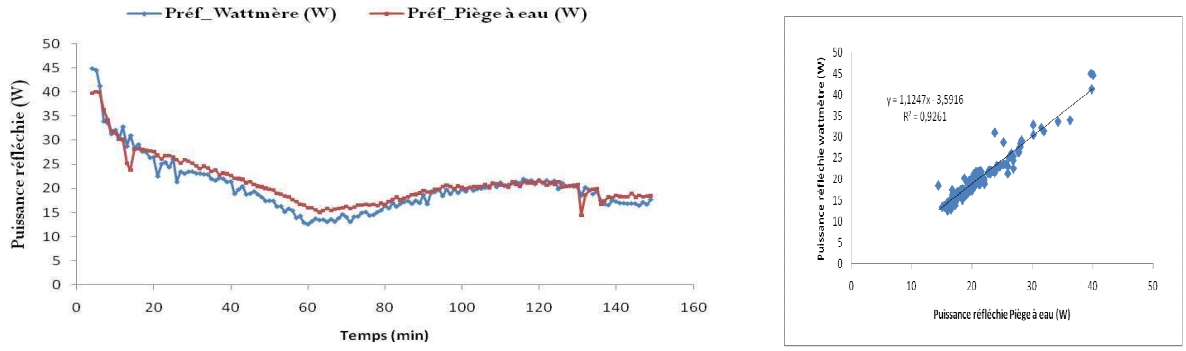
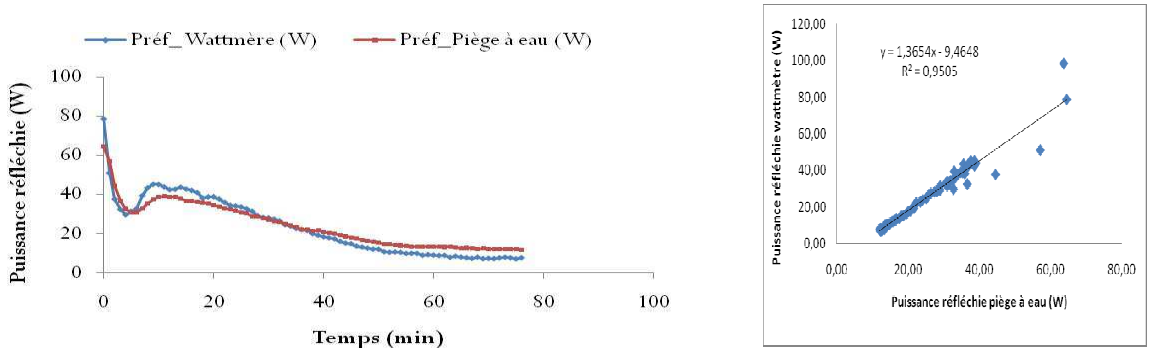



**Figure 2.10-** *Comparaison de la puissance réfléchie au niveau du wattmètre et du piège à eau à 3W/g - 50°C.*




.

**Figure 2.11-** *Comparaison de la puissance réfléchie au niveau du wattmètre et du piège à eau à 5W/g - 50°C.*

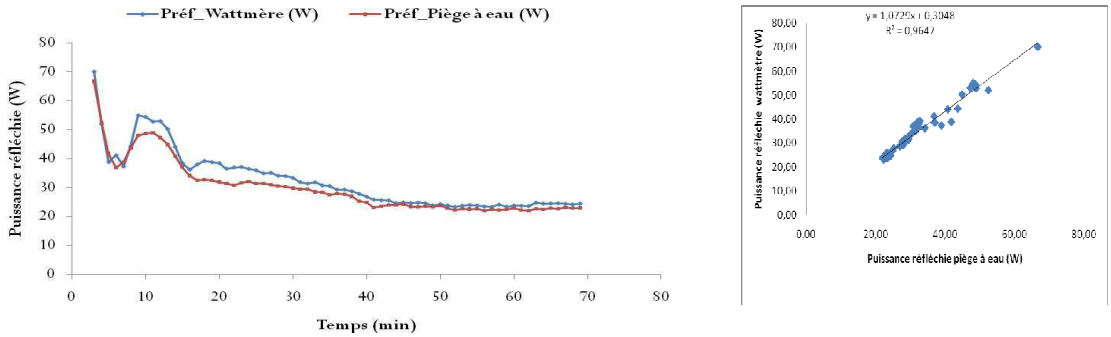



**Figure 2.12-** *Puissance réfléchie calculée et enregistrée par le wattmètre au cours d'un séchage microondes à 7W/g assisté par air chaud à 50°C.*

L'utilisation du débitmètre électromagnétique peut donc remplacer les wattmètres dans l'évaluation de la puissance réfléchie.

CONCLUSION PARTIELLE

Toutes les vérifications ont été réalisées. Pour la fibre optique utilisée, les précisions des résultats obtenus à 0°C et 100°C sont dans la gamme de ceux du certificat de calibration (voir annexe 1.1) de la centrale Neoptix. Les thermocouples donnent également des résultats de précision à 0°C et 100°C par rapport respectivement au mélange eau distillée et galce pilée et à l'eau distillée bouillante. L'acquisition de la masse peut se faire en continu et à chaque seconde avec un léger écart entre la masse réelle et la masse enregistrée en continu, à savoir un écart de 0,039g pour une charge de 4,85 g (environ 0,80%) et un écart de 0,041 g pour une charge 66,14 g (environ 0,06%). Le pilotage automatique de la puissance spécifique a aussi été mise en place. Le pilote de séchage microonde combiné à l'air chaud fonctionne aussi bien en mode automatique qu'en mode manuelle. Il nous semble donc que les essais de séchage peuvent être effectués avec une bonne précision.

## ANNEXE III-Détermination de la teneur en lycopène par spectrophotométrie UV-Visible.

Le lycopène est extrait en introduisant 1,5 à 2 g d'échantillon de tomate dans une fiole de 100 mL, dans laquelle 20 mL de la solution d'extraction (hexane -méthanol – acétone : 50/25/25) contenant 0,05% de BHT (di –ter-Butyl Hydroxy Toluène) sont ajoutés. La fiole est agitée pendant 15 min à l'aide d'un vortex. Après agitation, 5 mL d'eau distillée sont ajoutés à la fiole puis agité à nouveau pendant 5 minutes. Après la seconde agitation la fiole est laissée au repos pendant 5 min avant le dosage spectrométrique du lycopène.

Pour ce dosage, 2 mL de la solution contenue dans la fiole sont transvasés dans un bécher contenant 0,1 g de sulfate de sodium anhydre qui est agité manuellement pendant 30 secondes. Ensuite la solution est transférée dans une fiole de 10 mL contenant 0,4 mL d'hexane avec 0,4 % de BHT. Cette fiole est remplie avec de l'hexane jusqu'au très de jauge. Faire la mesure de l'absorbance ou de la densité optique à 502 nm avec comme solution de référence le BHT à 0,08% dans de l'hexane

La teneur en lycopène exprimée en mg/kg de tomate, est donnée par la formule suivante (Fish, Perkins-Veazie, & Collins, 2002); (Kong & Ismail, 2011):

$$C_{lyc}(mg/kg) = \frac{Abs_{502}\, F_d\, 10^6\, M_{Lyc} V_d}{\varepsilon_{Lyc(502)}\, 1000\, m_{ech}} \qquad (2.23)$$

Où : $Abs_{502}$ = absorbance ou densité optique (DO) de l'échantillon,

$F_d$ = facteur de dilution qui est de 5 dans notre cas,

$M_{Lyc}$ = masse molaire du lycopène ($C_{40}H_{56}$) : 536,87 g.mol$^{-1}$

$V_d$ = volume d'hexane d'extraction (mL) qui est de 10 mL.

$\varepsilon_{Lyc}$ = coefficient molaire d'extinction du lycopène à 502 nm en hexane : 158500 L.mol$^{-1}$.cm$^{-1}$ (Zechmeister, LeRosen, Schroeder, Polgár, & Pauling, 1943)

$m_{ech}$ = masse de l'échantillon (g)

La relation (2.14) devient alors :

$$C_{lyc}(mg/kg) = \frac{Abs_{502}.5.10^6.536{,}87.10}{158500.1000.m_{ech}} = \frac{Abs_{502}.169{,}36}{m_{ech}} \qquad (2.24)$$

Après la détermination des teneurs en lycopène des tomates fraîches et séchées, le taux résiduel en lycopène est déterminé en divisant la teneur en lycopène (en mg/100 g de MS) de la tomate fraiche sur celle de la tomate séchée (en mg/100 g de MS).

# ANNEXE IV-Caractérisation du séchage MOAC avec régulation de la puissance spécifique en continue a différentes conditions de séchage.

## 4.1- Régulation de la puissance en continue (mode 1)

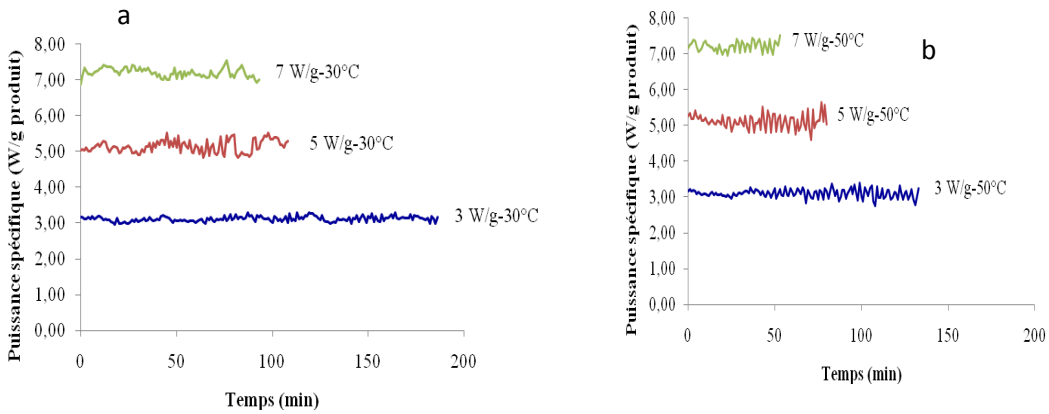



**Figure 4.1**- *Puissance spécifique régulée en continu (cycle d'1 s) à la "proportionnelle de la masse" de la tomate séchée à différentes conditions : a : 3, 5, et 7 W/g à 30°C et b : 3, 5, et 7 W/g à 50°C.*

## 4.2- Régulation de la puissance par intermittence (mode 2)

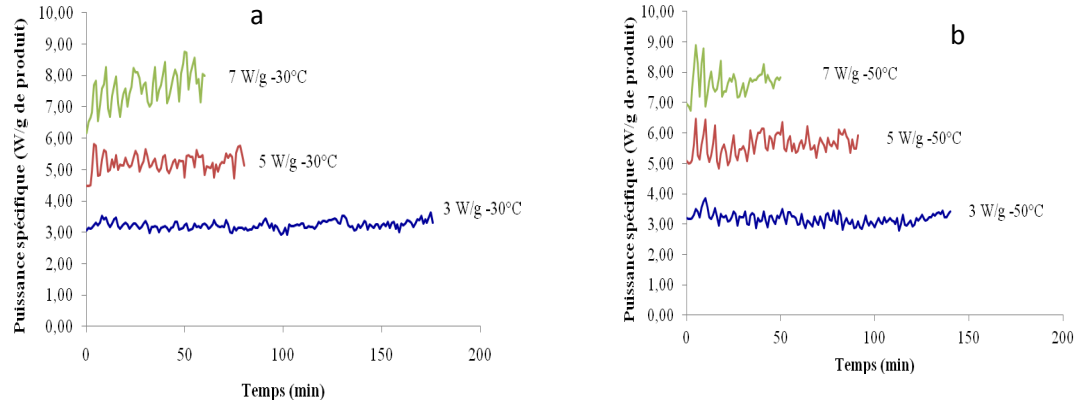
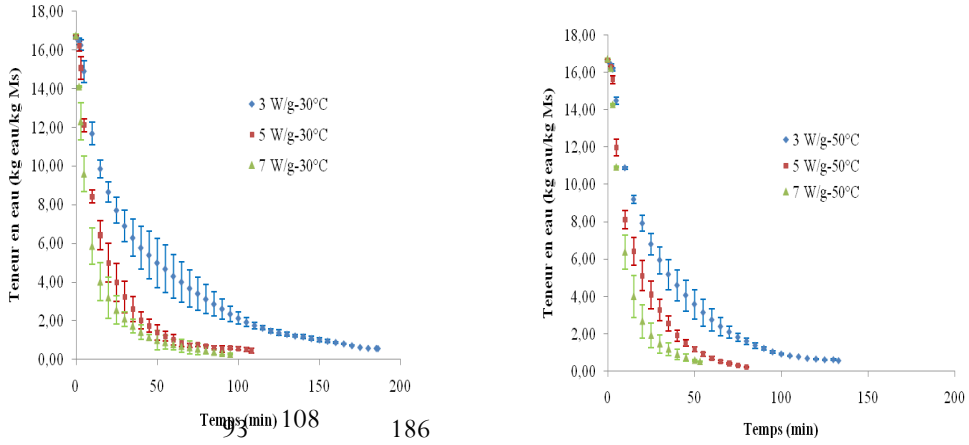



**Figure 4.2**- *Puissance spécifique régulée par intermittence (cycle de 300 s) à la "proportionnelle de la masse" de la tomate séchée dans différentes conditions : a : 3, 5, et 7 W/g à 30°C et b : 3, 5, et 7 W/g à 50°C.*

## 4.3- Cinétique et vitesse de séchage en séchage MOAC en pilotage continu de Ps à différentes conditions de séchage : Influence de la puissance




93 108 186

**Figure 4.3-** *Impact de la puissance sur la cinétique de séchage. Evolution de la teneur en eau de la tomate à différentes conditions de séchage MOAC avec régulation de la puissance spécifique en continu chaque seconde : a- 3 W/g-30°C, 5 W/g-30°C et 7 W/g-30°C et b- 3 W/g-50°C, 5 W/g-50°C et 7 W/g-50°C*

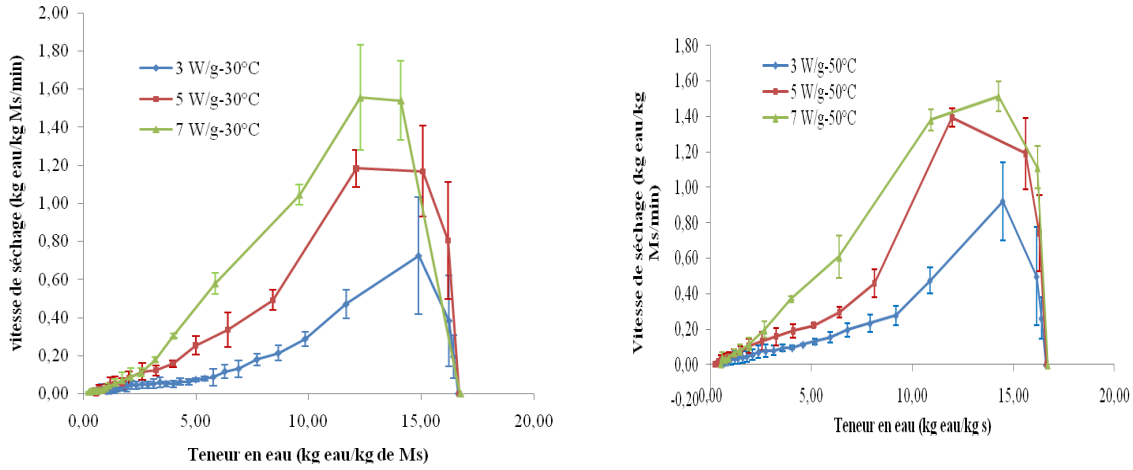



**Figure 4.4-** *Effet des puissances spécifiques sur vitesse de séchage à différentes conditions de séchage MOAC ( a- 3 W/g-30°C, 5 W/g-30°C et 7 W/g-30°C et b- 3 W/g-50°C, 5 W/g-50°C et 7 W/g-50°C à vitesse constante (1,5 m/s)) de la tomate, en régulation continue de la puissance spécifique.*

## 4.4- Cinétique et vitesse de séchage en séchage MOAC en pilotage continu de Ps à différentes conditions de séchage : Influence de la température

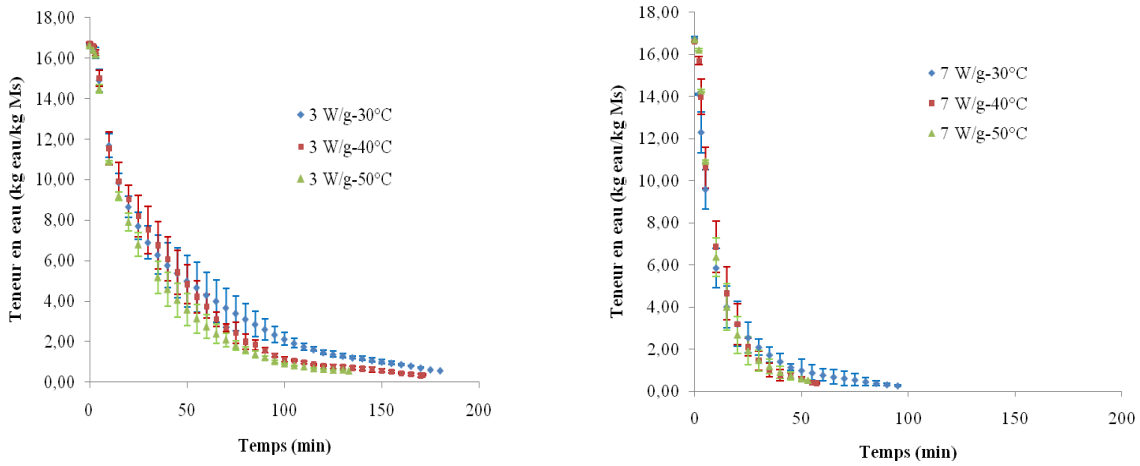



**Figure 4.5**- *Impact de la température sur la cinétique de séchage. Evolution de la teneur en eau de la tomate à différentes conditions de séchage avec régulation de la puissance spécifique en continu chaque seconde : a -30, 40, 50°C- 3W/g ; b) -30, 40, 50°C- 7W/g.*

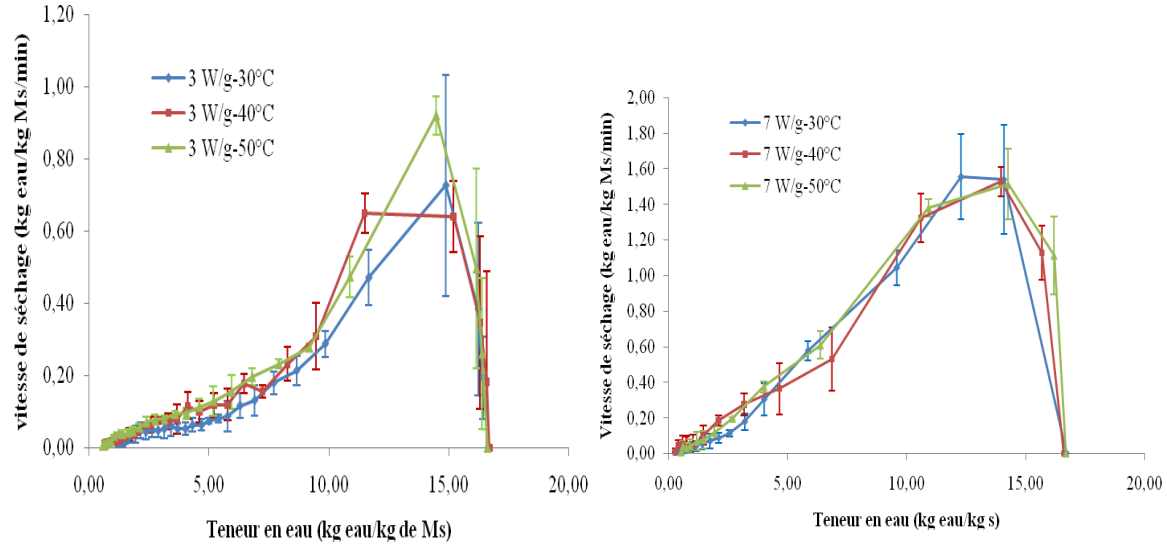



**Figure 4.6-** *Effet de la température (30°C ; 40°C ; 50°C) sur vitesse du séchage microondes /air chaud de la tomate, à vitesse constante (1,5 m/s) en régulation continue de la puissance spécifique (3W/g).*

## 4.5-Evolution de la température du produit à différentes conditions de séchage

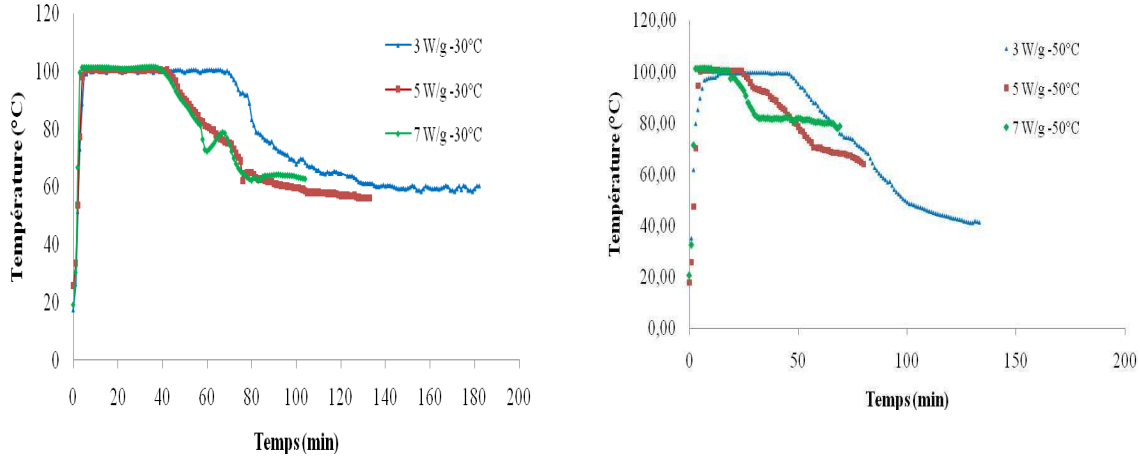



**Figure 4.7-** *Evolution de la température de la tomate au cours séchage MOAC avec régulation de la puissance spécifique en continu à différentes conditions : a) 3 W/g-30°C, 5W/g-30°C et 7W/g-30°C et b) 3 W/g-50°C, 5W/g-50°C et 7W/g-50°C.*

## 4.6-Evolution de la Puissance MO absorbée et température en fonction de la teneur en eau.

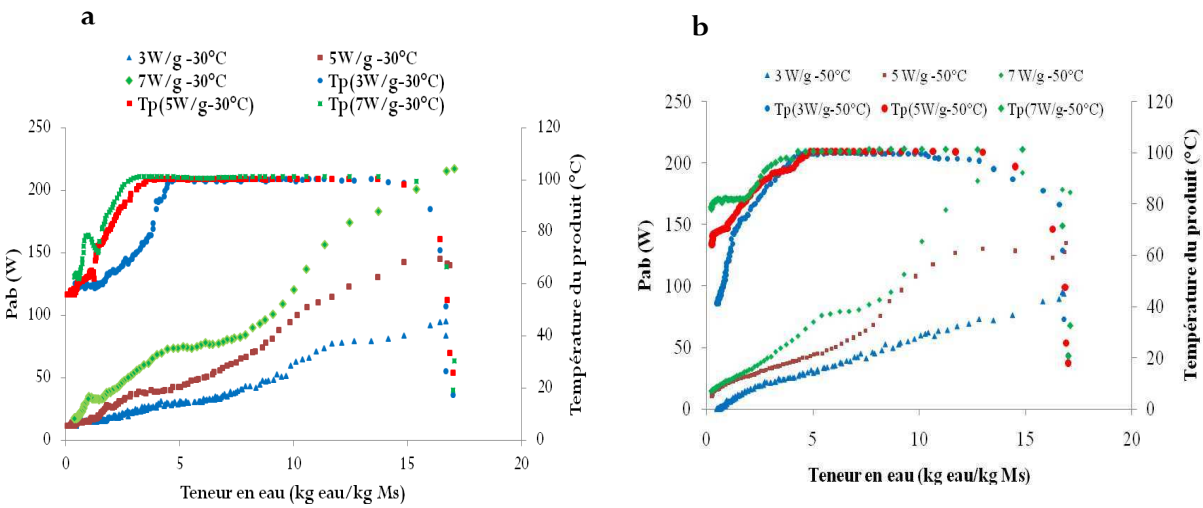



**Figure 4.8-** *Evolution de la puissance microondes absorbée et de la température du produit en fonction de la teneur en eau, en régulation continue (chaque seconde) de la puissance spécifique, avec fixation de température de l'air à : a- 30°C et b-50°C.*

## 4.7-Evolution de la vitesse de séchage en fonction de la puissance absorbée

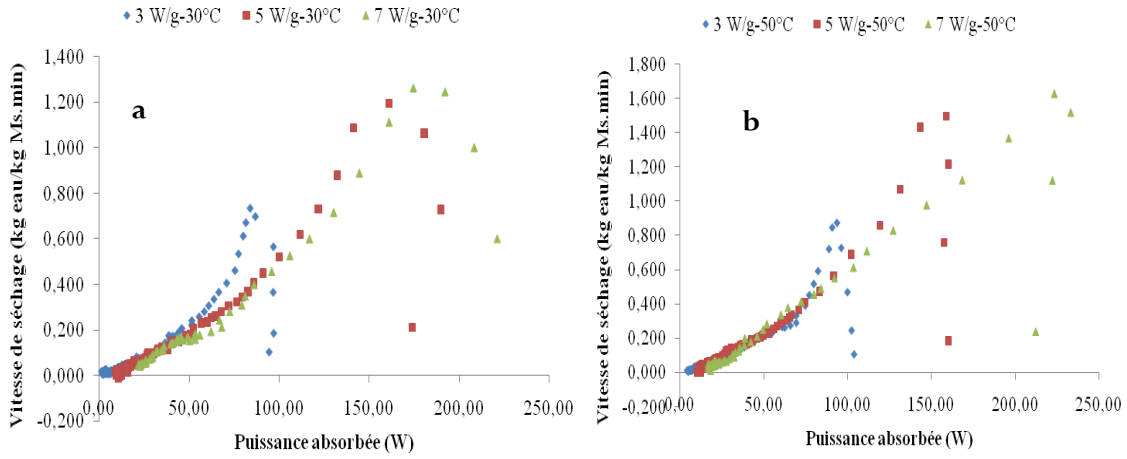



**Figure 4.9**- *Vitesse de séchage de la demi-tomate en fonction de la puissance absorbée au cours du séchage MOAC à différentes conditions de séchage : a) 3W/g-30°C, 5W/g-30°C, 7W/g-30°C et b) 3W/g-50°C, 5W/g-50°C, 7W/g-50°C*

## 4.8-Evolution du bilan thermique évaporatoire en fonction du temps de séchage

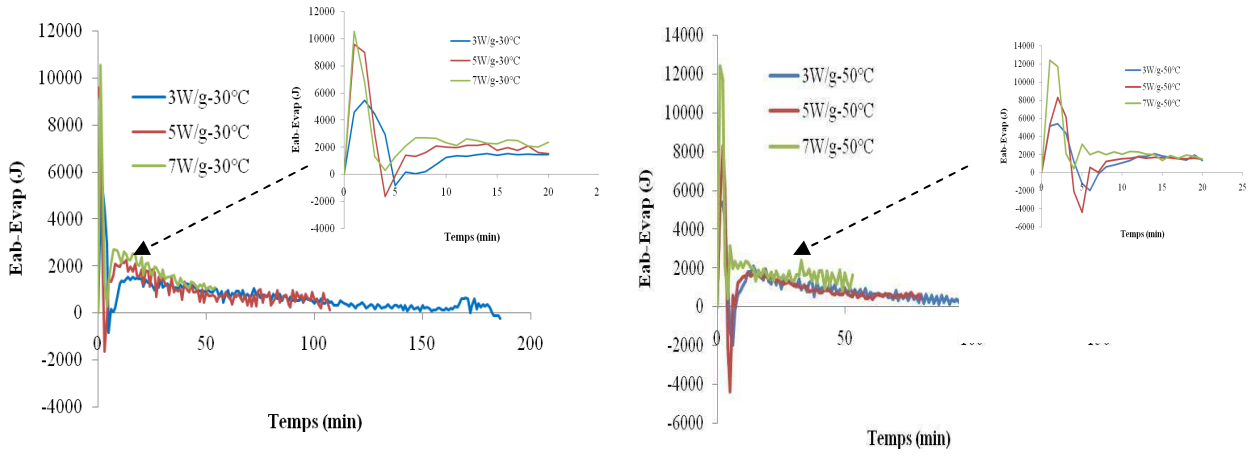



**Figure 4.10-** *Bilan thermique évaporatoire en séchage MOAC avec régulation de la puissance spécifique à différentes conditions (a ) 3W/g-30°C, 5W/g-30°C, 7W/g-30°C ; b) 3W/g-50°C, 5W/g-50°C, 7W/g-50°C)*

## 4.9- Evaluation de la couleur au cours du séchage microondes air chaud aux puissances de 3, 5 et 7 W/g et aux températures d'air de 30 et 50°C.

### Paramètre de la luminance L*

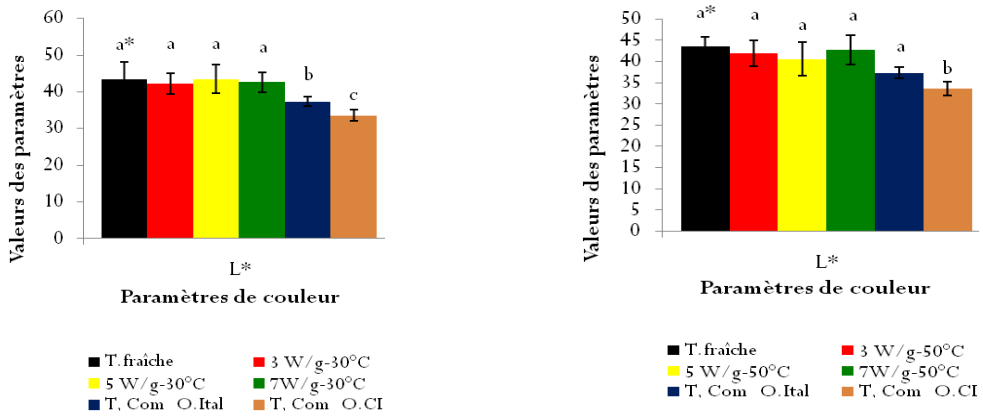



**Figure 4.11-** *Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre L*(Luminance) des demi-tomates séchées par MOAC (30 et 50°C) pour différents niveaux de puissances spécifiques . Comparaison du paramètre L* de la tomate fraiche, séchée par MOAC (30 et 50°C) et des tomates commerciales italienne et ivoirienne.*

** les barres du paramètre ayant des lettres différentes sont significativement différents (P < 0,05).*

*T.Com_OItal = Tomate commerciale - Origine Italie ; T.Com_CI = Tomate commerciale - Origine côte d'Ivoire. T. fraîche = Tomate fraîche.*

### Paramètre de la teinte rouge a*

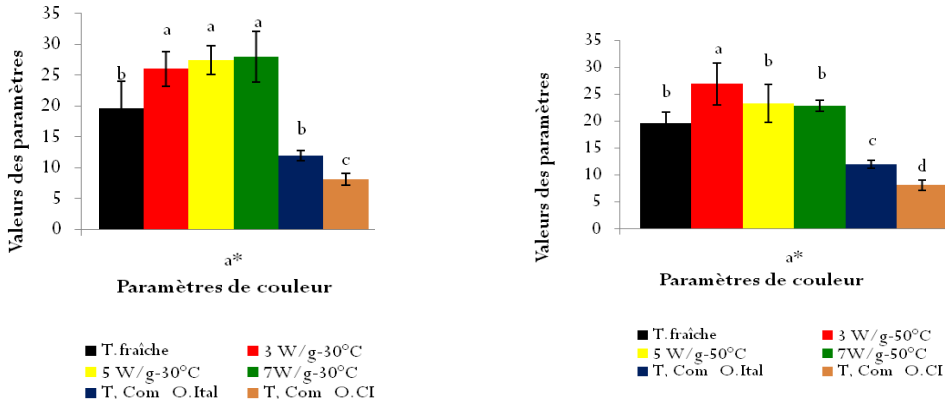



**Figure 4.12-** *Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre a*(couleur rouge) des demi-tomates séchées par MOAC (30 et 50°C) pour différents niveaux de puissances spécifiques. Comparaison du paramètre a* de la tomate fraiche, séchée par MOAC (30 et 50°C) et des tomates commerciales italienne et ivoirienne.*

** les barres du paramètre ayant des lettres différentes sont significativement différents (P < 0,05).*

*T.Com_OItal = Tomate commerciale - Origine Italie ; T.Com_CI = Tomate commerciale - Origine côte d'Ivoire. T. fraîche = Tomate fraîche.*

### Paramètre de la teinte jaune b*

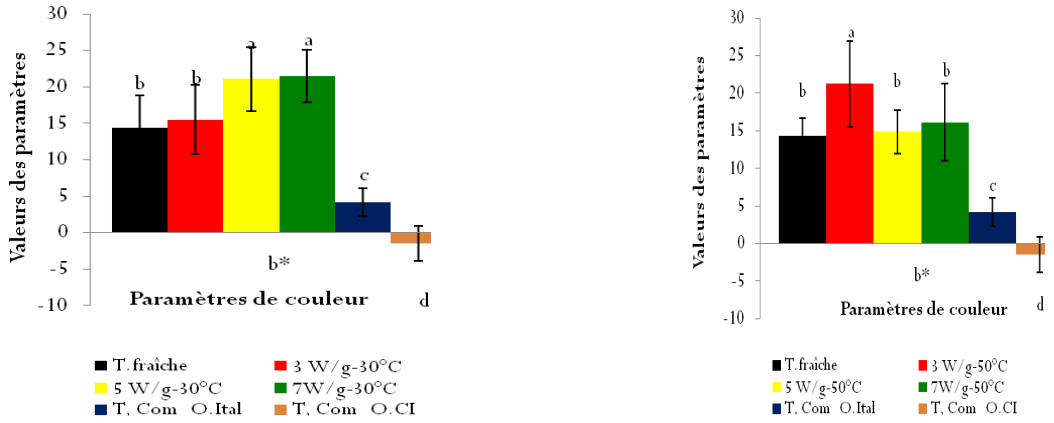



**Figure 4.13-** *Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre b*(couleur jaune) des demi-tomates séchées par MOAC (30 et 50°C) pour différents niveaux de puissances spécifiques. Comparaison du paramètre a* de la tomate fraiche, séchée par MOAC (30 et 50°C) et des tomates commerciales italienne et ivoirienne.*

** les barres du paramètre ayant des lettres différentes sont significativement différents (P < 0,05).*

*T.Com_OItal = Tomate commerciale - Origine Italie ; T.Com_CI = Tomate commerciale - Origine côte d'Ivoire. T. fraîche = Tomate fraîche.*

### Paramètre de la qualité de la couleur a*/b*

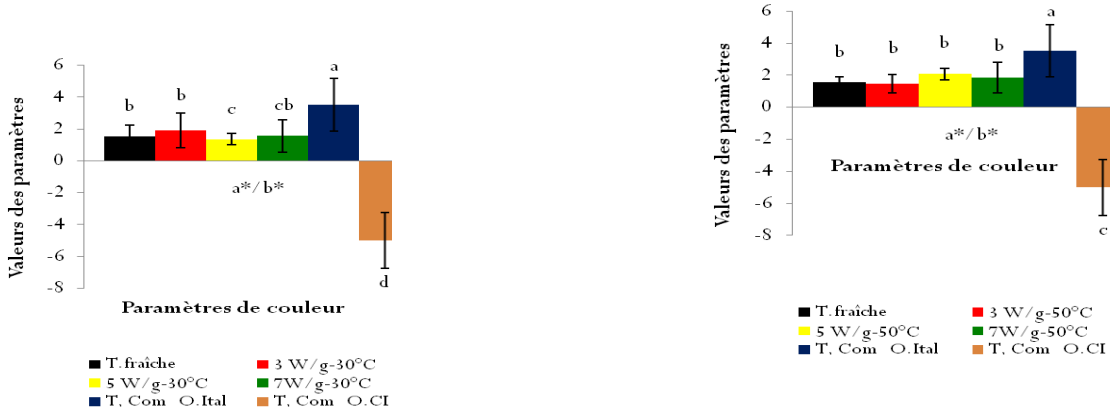



**Figure 4.14-** *Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre a*/b*(qualité de la couleur) des demi-tomates séchées par MOAC (30 et 50°C) pour différents niveaux de puissances spécifiques. Comparaison du paramètre a*/b* de la tomate fraiche, séchée par MOAC (30 et 50°C) et des tomates commerciales italienne et ivoirienne.*

** les barres du paramètre ayant des lettres différentes sont significativement différents (P < 0,05).*

*T.Com_OItal = Tomate commerciale - Origine Italie ; T.Com_CI = Tomate commerciale - Origine côte d'Ivoire. T. fraîche = Tomate fraîche.*

### Paramètre de saturation C*

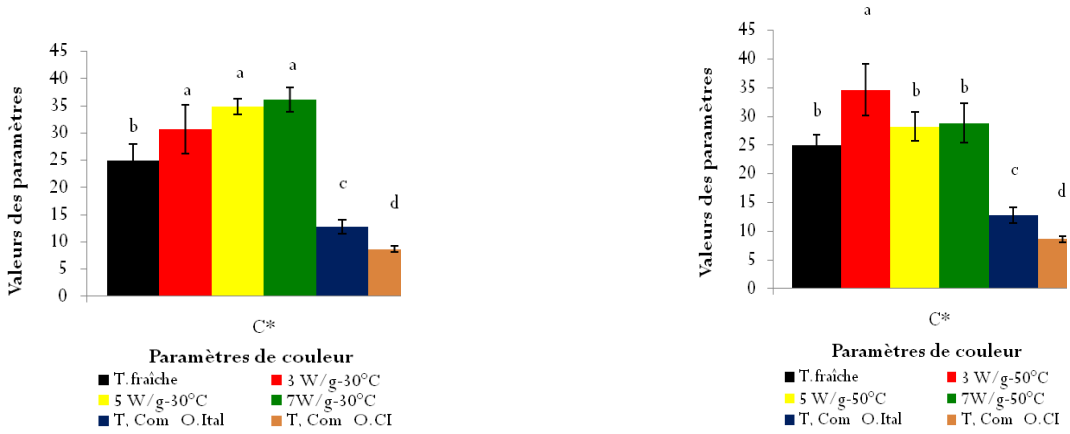



**Figure 4.15-** *Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre C*(saturation) des demi-tomates séchées par MOAC (30 et 50°C) pour différents niveaux de puissances spécifiques. Comparaison du paramètre C* de la tomate fraiche, séchée par MOAC (30 et 50°C) et des tomates commerciales italienne et ivoirienne.*

** les barres du paramètre ayant des lettres différentes sont significativement différents (P < 0,05).*

*T.Com_OItal = Tomate commerciale - Origine Italie ; T.Com_CI = Tomate commerciale - Origine côte d'Ivoire. T. fraîche = Tomate fraîche.*

### Paramètre de l'angle de teinte h°




**Figure 4.16-** *Influence de la puissance microondes sur l'évolution du paramètre h°(angle de teinte) des demi-tomates séchées par MOAC (30 et 50°C) pour différents niveaux de puissances spécifiques. Comparaison du paramètre h° de la tomate fraiche, séchée par MOAC (30 et 50°C) et des tomates commerciales italienne et ivoirienne.*

** les barres du paramètre ayant des lettres différentes sont significativement différents (P < 0,05).*

*T.Com_OItal = Tomate commerciale - Origine Italie ; T.Com_CI = Tomate commerciale - Origine côte d'Ivoire. T. fraîche = Tomate fraîche.*

**4.10- Influence de la puissance microondes sur taux résiduel en lycopène au cours du séchage microondes air chaud aux puissances de 3, 5 et 7 W/g et aux températures d'air de 30 et 50°C**

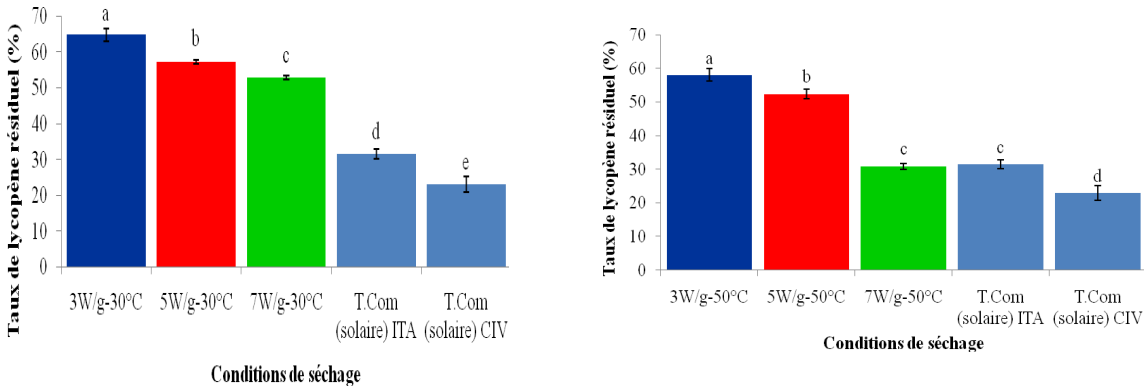



**Figure 4.17-** *Effet de la puissance MO sur le taux résiduel en lycopène résiduel de la tomate séchée par MOAC (à 30-50°C) avec régulation de Ps à différentes conditions de séchage. Comparaison du taux résiduel en lycopène des tomates séchées par MOAC (30-50°C) et des tomates commerciales.*

** les barres pour les taux résiduels ayant les lettres différentes sont significativement différents (P<0,05). T.Com_ITA= Tomate commerciale : Origine Italie ; T.Com_CIV = Tomate commerciale : Origine côte d'Ivoire.*

**4.10- Influence de la température de l'air sur taux résiduel en lycopène au cours du séchage microondes air chaud aux puissances de 3, 5 et 7 W/g et aux températures d'air de 30 et 50°C**

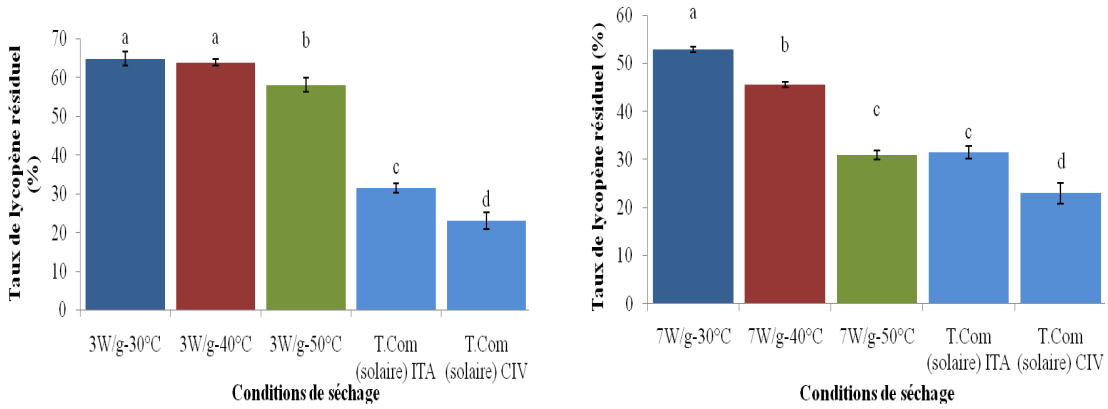
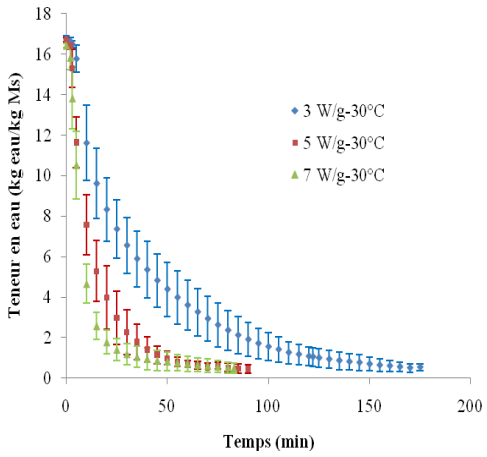



**Figure 4.18-** *Effet de la puissance MO sur le taux résiduel en lycopène résiduel de la tomate séchée par MOAC (à 3-7W/g et température d'air variable) avec régulation de Ps à différentes conditions de séchage. Comparaison du taux résiduel en lycopène des tomates séchées par MOAC (à 3-7W/g et température d'air variable) et des tomates commerciales.*

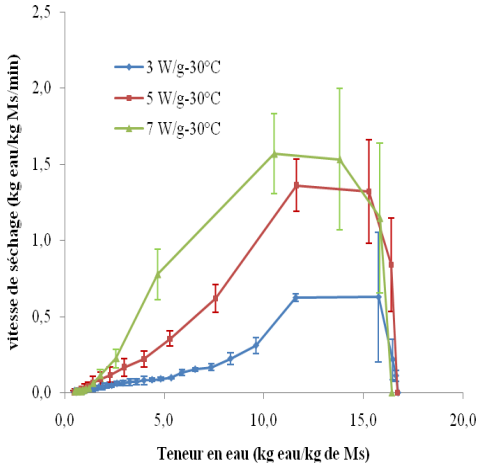
** les barres pour les taux résiduels ayant les lettres différentes sont significativement différents (P<0,05). T.Com_ITA= Tomate commerciale : Origine Italie ; T.Com_CIV = Tomate commerciale : Origine côte d'Ivoire.*

# ANNEXE V - Caractéristiques des courbes de cinétiques et vitesses de séchage du mode 2 (régulation par intermittence)

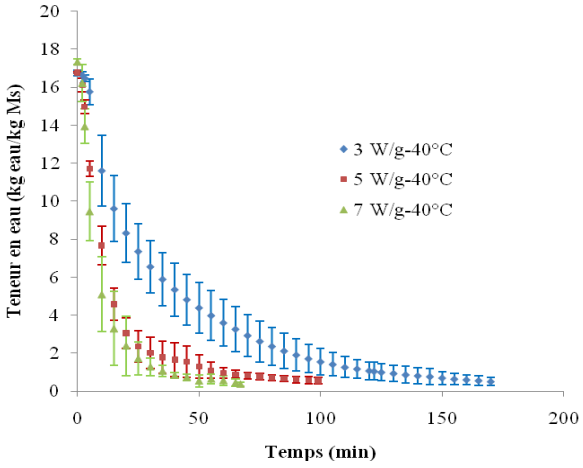
***ANNEXE 5.1***- *Mode2 : Cinétiques et vitesses de séchage –Influence de la Ps*



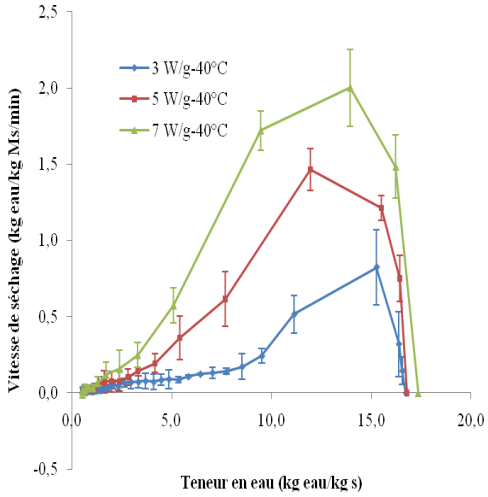

**A.5.1a-***Cinétique de séchage MOAC(30°C) avec pilotage de Ps par intermittence*




**A.5.1b-***Vitesse de séchage MOAC(30°C) avec pilotage de Ps par intermittence*

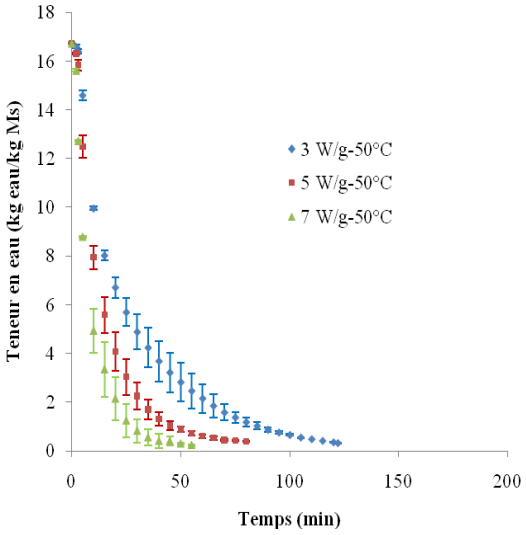



**A.5.1c-***Cinétique de séchage MOAC(40°C) avec pilotage de Ps par intermittence*

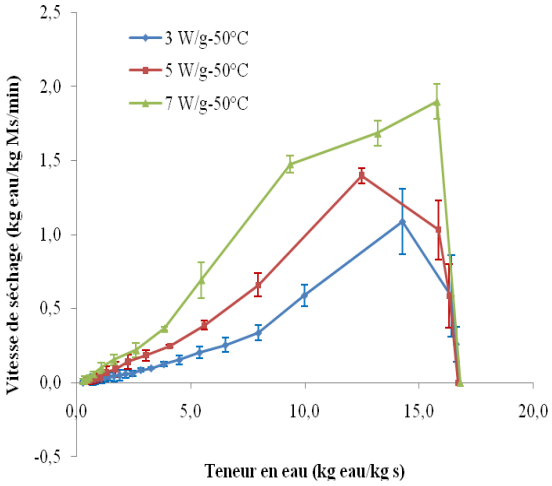



**A.5.1d-***Vitesse de séchage MOAC(40°C) avec pilotage de Ps par intermittence*

***ANNEXE 5.1** (suite)- Stratégie 2 : Cinétiques et vitesses de séchage*

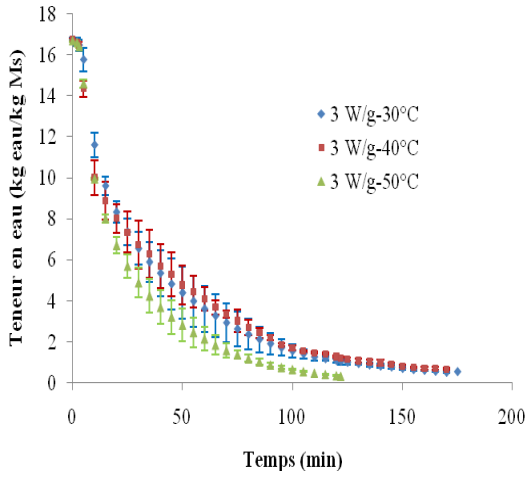



**A.5.1e-***Cinétique de séchage MOAC(50°C) avec pilotage de Ps par intermittence*

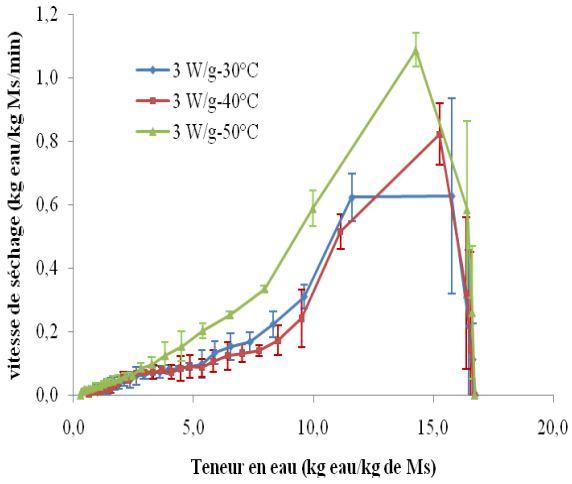



**A.5.1f-***Vitesse de séchage MOAC(50°C) avec pilotage de Ps par intermittence*

***ANNEXE 5.2** - Mode 2 : Cinétiques et vitesses de séchage –Influence de la température*

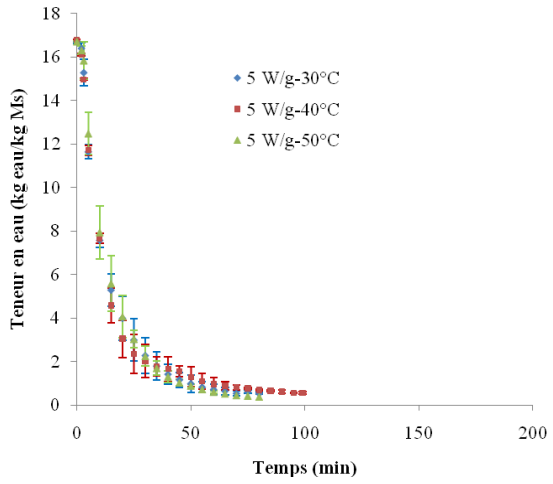



**A.5.2a-***Cinétique de séchage MOAC(3W/g) avec pilotage de Ps par intermittence*

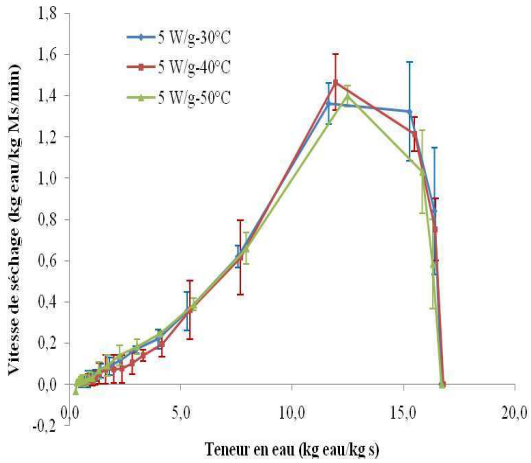



**A.5.2b-***Vitesse de séchage MOAC(3W/g) avec pilotage de Ps par intermittence*

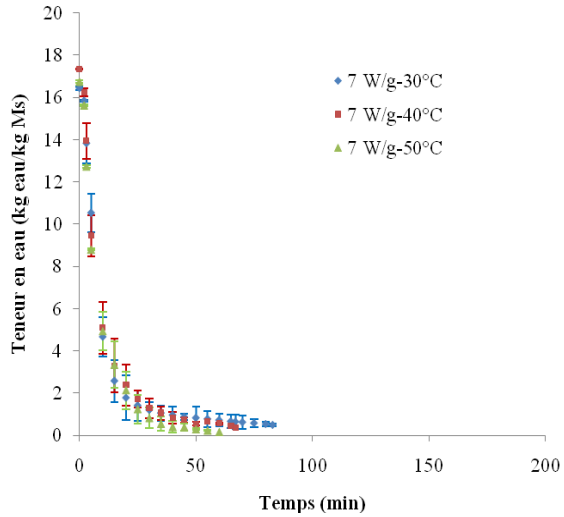
**ANNEXE 5.2** *(suite)- Mode 2 : Cinétiques et vitesses de séchage –Influence de la température*



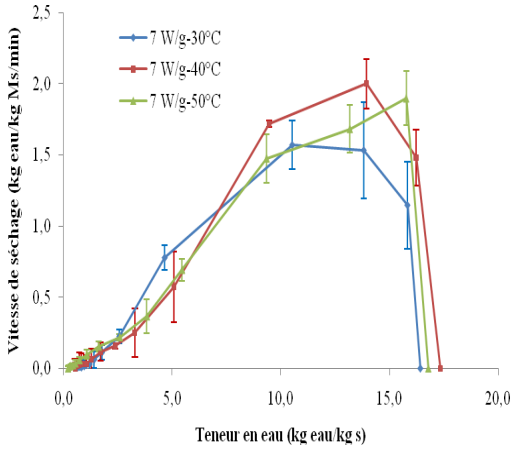

**A.5.2c-***Cinétique de séchage MOAC(5W/g) avec pilotage de Ps par intermittence*




**A.5.2d-***Vitesse de séchage MOAC(5W/g) avec pilotage de Ps par intermittence*




**A.5.2e-***Cinétique de séchage MOAC(7W/g) avec pilotage de Ps par intermittence*




**A.5.2f-***Vitesse de séchage MOAC(7W/g) avec pilotage de Ps par intermittence*

## ANNEXE VI -Comparaison de la texture des deux modes de séchage aux puissances spécifiques de 3,5 et 7 W/g et à la température de 30 et 50°C

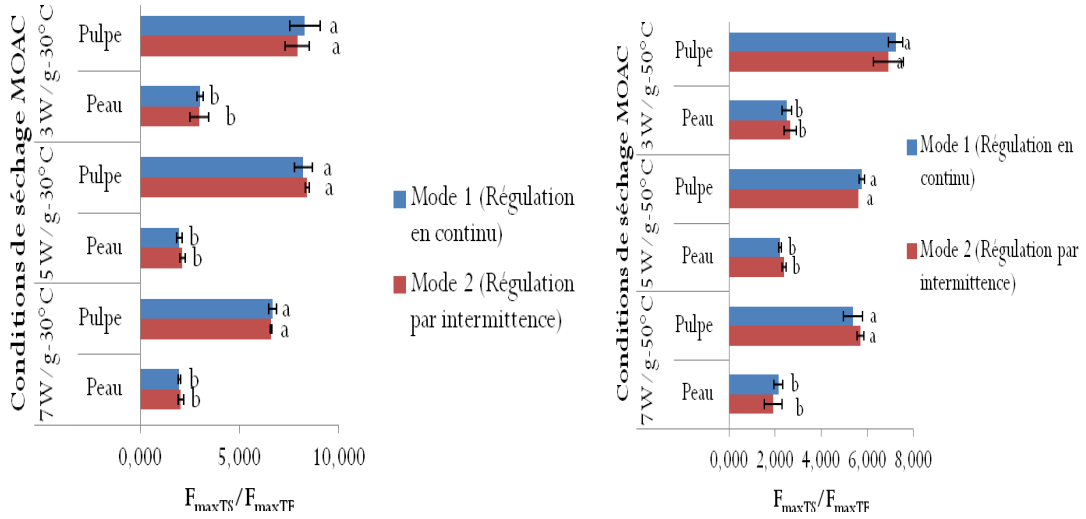



**Figure 6.1-** *Comparaison de la texture obtenue par séchage MOAC (30-50°C) de la tomate au cours des modes de pilotage de la puissance spécifique en continu (mode 1) et par intermittence de 5 min (mode 2).*

## ANNEXE VII -Evolution du logarithme de la teneur en eau réduite en fonction du temps aux puissances spécifiques de 3,5 et 7 W/g et à la température de 30 et 50°C

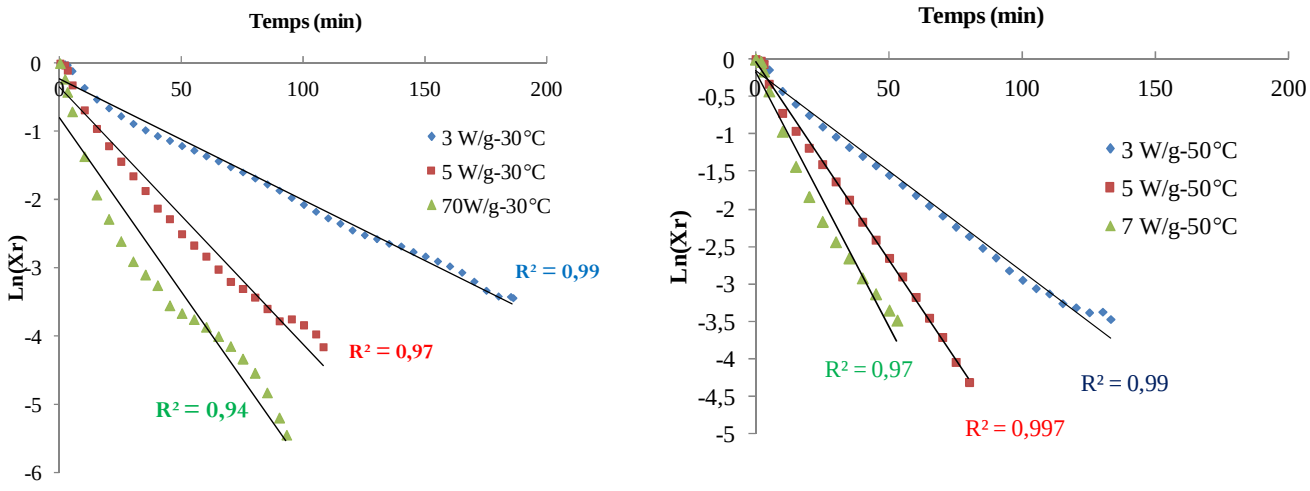



**Figure 7.1-** *Variation de ln(Xr) avec le temps à différentes conditions de séchage MOAC (30-50°C) de la demi-tomate.*

# ANNEXE VIII- Analyse de la variance des modèles pour l'optimisation

## 8.1-Reponses relatives au procede

### Durée de séchage (DS)

**Analyse de la variance**

| Source | Degrés de liberté | Somme des carrés | Carré moyen | Rapport F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 9 | 26236,455 | 2915,16 | 19,6631 |
| Résidus | 5 | 741,279 | 148,26 | Prob. > F |
| Total | 14 | 26977,733 | | 0,0022* |

**Défaut d'ajustement**

| Source | Degrés de liberté | Somme des carrés | Carré moyen | Rapport F |
|---|---|---|---|---|
| Défaut d'ajustement | 3 | 732,61207 | 244,204 | 56,3548 |
| Erreur pure | 2 | 8,66667 | 4,333 | Prob. > F |
| Erreur totale | 5 | 741,27873 | | 0,0175* |
| | | | | R carré max. |
| | | | | 0,9997 |

### Consommation énergétique massique totale (CEMt)

**Analyse de la variance**

| Source | Degrés de liberté | Somme des carrés | Carré moyen | Rapport F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 9 | 24938,406 | 2770,93 | 16,2680 |
| Résidus | 5 | 851,652 | 170,33 | Prob. > F |
| Total | 14 | 25790,059 | | 0,0034* |

**Défaut d'ajustement**

| Source | Degrés de liberté | Somme des carrés | Carré moyen | Rapport F |
|---|---|---|---|---|
| Défaut d'ajustement | 3 | 777,36234 | 259,121 | 6,9759 |
| Erreur pure | 2 | 74,29007 | 37,145 | Prob. > F |
| Erreur totale | 5 | 851,65241 | | 0,1279 |
| | | | | R carré max. |
| | | | | 0,9971 |

## 8.2-Reponses relatives a la qualite du produit

### Paramètre de la couleur rouge Δa*

**Analyse de la variance**

| Source | Degrés de liberté | Somme des carrés | Carré moyen | Rapport F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 9 | 228,26358 | 25,3626 | 3,3404 |
| Résidus | 5 | 37,96334 | 7,5927 | Prob. > F |
| Total | 14 | 266,22692 | | 0,0987 |

**Défaut d'ajustement**

| Source | Degrés de liberté | Somme des carrés | Carré moyen | Rapport F |
|---|---|---|---|---|
| Défaut d'ajustement | 3 | 22,255927 | 7,41864 | 0,9446 |
| Erreur pure | 2 | 15,707413 | 7,85371 | Prob. > F |
| Erreur totale | 5 | 37,963339 | | 0,5511 |
| | | | | R carré max. |
| | | | | 0,9410 |

### Paramètre de la saturation de la couleur C*

**Analyse de la variance**

| Source | Degrés de liberté | Somme des carrés | Carré moyen | Rapport F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 9 | 150,00092 | 16,6668 | 0,7370 |
| Résidus | 5 | 113,06748 | 22,6135 | Prob. > F |
| Total | 14 | 263,06840 | | 0,6751 |

**Défaut d'ajustement**

| Source | Degrés de liberté | Somme des carrés | Carré moyen | Rapport F |
|---|---|---|---|---|
| Défaut d'ajustement | 3 | 79,68962 | 26,5632 | 1,5917 |
| Erreur pure | 2 | 33,37787 | 16,6889 | Prob. > F |
| Erreur totale | 5 | 113,06748 | | 0,4083 |
| | | | | R carré max. |
| | | | | 0,8731 |

### Paramètre de la couleur de teinte Δh°

**Analyse de la variance**

| Source | Degrés de liberté | Somme des carrés | Carré moyen | Rapport F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 9 | 319,19062 | 35,4656 | 0,7387 |
| Résidus | 5 | 240,04215 | 48,0084 | Prob. > F |
| Total | 14 | 559,23277 | | 0,6741 |

**Défaut d'ajustement**

| Source | Degrés de liberté | Somme des carrés | Carré moyen | Rapport F |
|---|---|---|---|---|
| Défaut d'ajustement | 3 | 76,05409 | 25,3514 | 0,3092 |
| Erreur pure | 2 | 163,98807 | 81,9940 | Prob. > F |
| Erreur totale | 5 | 240,04215 | | 0,8217 |
| | | | | R carré max. |
| | | | | 0,7068 |

## Fermeté de la tomate séchée

**Analyse de la variance**

| Source | Degrés de liberté | Somme des carrés | Carré moyen | Rapport F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 9 | 4,8140444 | 0,534894 | 0,7472 |
| Résidus | 5 | 3,5794889 | 0,715898 | **Prob. > F** |
| Total | 14 | 8,3935333 | | 0,6689 |

**Défaut d'ajustement**

| Source | Degrés de liberté | Somme des carrés | Carré moyen | Rapport F |
|---|---|---|---|---|
| Défaut d'ajustement | 3 | 2,6282222 | 0,876074 | 1,8419 |
| Erreur pure | 2 | 0,9512667 | 0,475633 | **Prob. > F** |
| Erreur totale | 5 | 3,5794889 | | 0,3708 |
| | | | | **R carré max.** |
| | | | | 0,8867 |

## Teneur en lycopène résiduel

**Analyse de la variance**

| Source | Degrés de liberté | Somme des carrés | Carré moyen | Rapport F |
|---|---|---|---|---|
| Modèle | 9 | 2342,4216 | 260,269 | 7,4370 |
| Résidus | 5 | 174,9833 | 34,997 | **Prob. > F** |
| Total | 14 | 2517,4049 | | 0,0199* |

**Défaut d'ajustement**

| Source | Degrés de liberté | Somme des carrés | Carré moyen | Rapport F |
|---|---|---|---|---|
| Défaut d'ajustement | 3 | 170,85450 | 56,9515 | 27,5874 |
| Erreur pure | 2 | 4,12880 | 2,0644 | **Prob. > F** |
| Erreur totale | 5 | 174,98330 | | 0,0352* |
| | | | | **R carré max.** |
| | | | | 0,9984 |

# ANNEXE IX- Validation des conditions optimales obtenues au cours du séchage MOAC en utilisant les méthodes des surfaces de réponses (RSM) classique et la méthode CORICO

**TABLEAU 9.1-** *Comparaison entre valeurs expérimentales (3 répétitions) et valeurs prédites par les modèles pour les différentes réponses au point optimal obtenu par la méthode classique*

| Réponses | Valeur calculée | Valeur expérimentale |
|---|---|---|
| **Δa*** | 9,560 | 4,96 (±1,67) |
| **C*** | 52,42 | 52,54 (±0,66) |
| **Δh°** | 5,652 | 10,82 (±3,90) |
| **Ferm** | 2,628 | 2,58 (±0,21) |
| **Lyc_rés(%)** | 74,96 | 67,25 (±2,26) |
| **DS (min.)** | 98,37 | 92,33 (±9,29) |
| **CEM(MJ/kg)** | 74,28 | 65,96 (±4,99) |

**Tableau 9.2-** *Comparaison entre valeurs expérimentales (3 répétitions) et valeurs prédites par les modèles pour les différentes réponses au point optimal obtenu par la méthode CORICO*

| Paramètres | Réponses | |
|---|---|---|
| | Valeur calculée | Valeur expérimentales |
| Δa* | 10,68 | 10,04 (±4,84) |
| C* | 57,35 | 50,70 (±5,83) |
| Δh° | -0,096 | 2,81 (±2,59) |
| Ferm | 1,915 | 2,48 (±0,77) |
| Lyc | 75,12 | 54,39 (±4,75) |
| DS | 96,39 | 90,00 (±4,36) |
| CEM | 75,34 | 72,19 (±0,68) |

# ANNEXE X- Présentation de quelques interactions logiques des modèles CORICO

**Tableau 10.1**- Présentation des interactions logiques (et les surfaces de réponses correspondantes), intervenant dans le modèle du paramètre couleur Δa*

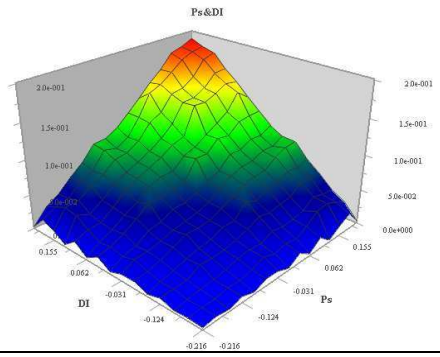
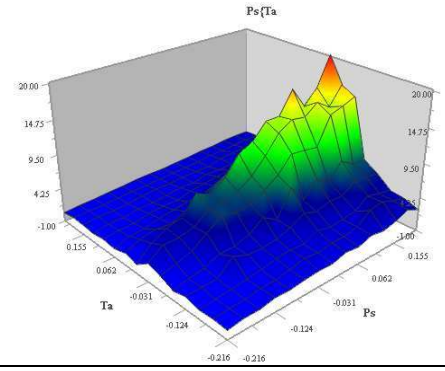
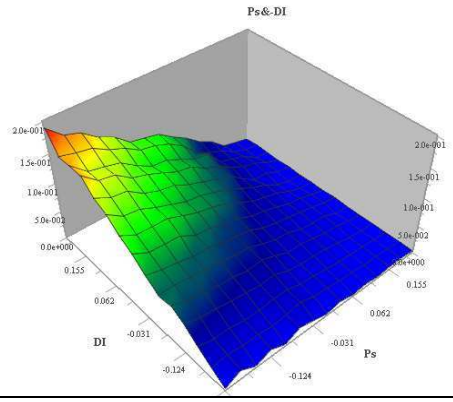
| Régresseur | Nom interaction - commentaires | Surface de réponse |
|---|---|---|
| Ps&DI | Ps ET DI – La réponse Δa* est élevée quand Ps et DI sont élevée |   |
| Ps{Ta | Ps MOYEN SI Ta – La réponse Δa* est élevée lorsque Ps est moyen si Ta est élevé |   |
| Ps&-DI | Ps ET NON DI – La réponse Δa* est élevée lorsque Ps est élevé et DI est bas |   |

**Tableau 10.2**- Présentation des interactions logiques (et les surfaces de réponses correspondantes), intervenant dans le modèle de la variable Lyc_Rés.

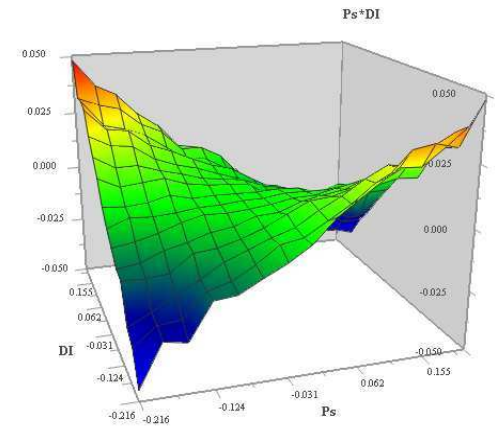
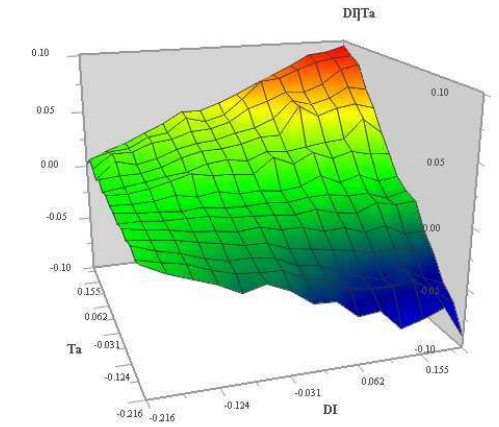
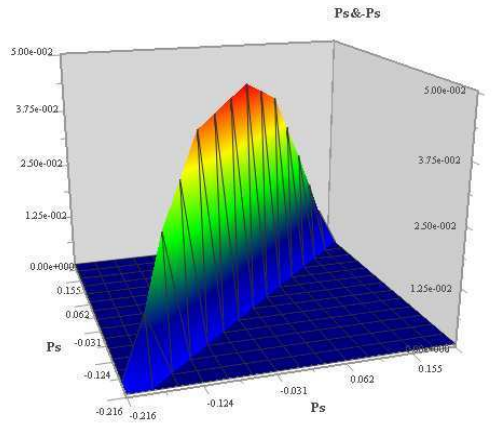
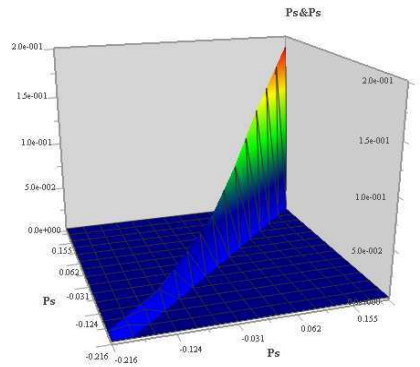
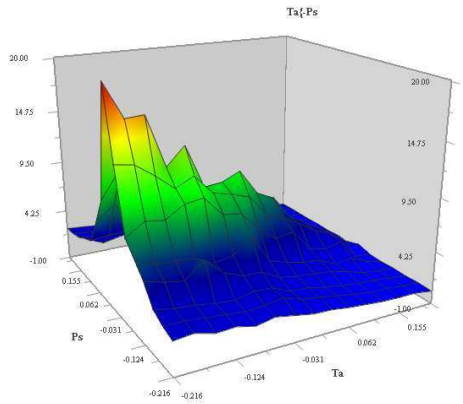
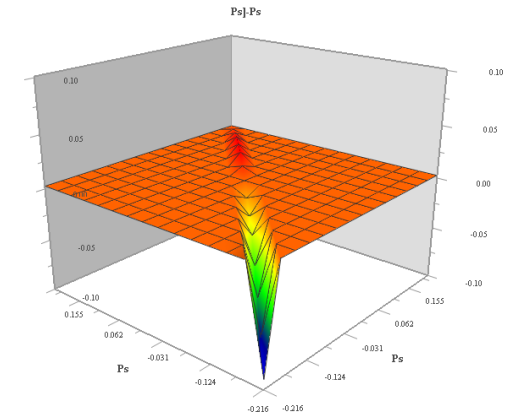
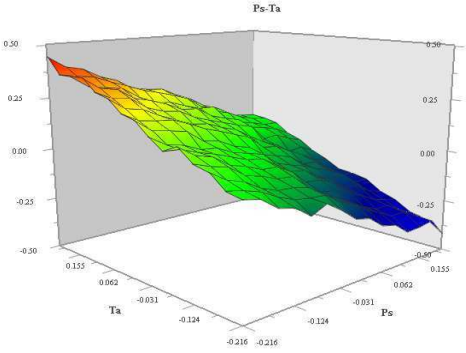
| | | |
|---|---|---|
| Ps*DI | Ps OU EXCLUSIF DI – La réponse Lyc_Rés est forte lorsque Ps est fort et DI faible ou Ps est faible et DI fort |  |
| DIJTa | DI SI Ta – La réponse Lyc_rés.* est forte lorsque DI est élevé si Ta est élevé. |  |
| Ps&-Ps | Ps ET NON Ps– La réponse Lyc_rés. est forte lorsque Ps est moyen |  |

**Tableau 10.3**- Présentation des interactions logiques (et les surfaces de réponses correspondantes), intervenant dans le modèle de la variable DS.

| Régresseur | Nom interaction - commentaires | Surface de réponse |
|---|---|---|
| Ps&Ps | Ps ET Ps – La réponse DS est élevée quand Ps uniquement élevé |  |
| Ta{-Ps | Ta MOYEN SI NON Ps – La réponse est élevée lorsque Ta est moyen et Ps faible |  |
| Ps]-Ps | Ps SI NON Ps – La réponse est élevée si Ps est moyen ou élevé |  |
| | Ps MOINS Ta la différence de Ps et Ta (centrés-réduits) est forte |  |