

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie - El Harrach-Alger

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة - الحراش - الجزائر

Département de Technologie Alimentaire

## Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Sciences Agronomiques

*Option : Sciences Alimentaires*

## Thème

### La déshydratation osmotique de la pomme de terre

Présenté par : M<sup>Mme</sup> MIHOUBI Mehdi

Soutenu le : / / 2012

#### Jury:

Président : M<sup>r</sup> GHEZLANE L. Professeur (Ministère de l'agriculture).

Promoteur : M<sup>r</sup> FERRADJI A. Professeur (E.N.S.A. El Harrach).

Examineurs : M<sup>r</sup> BOUSNADJI R. Docteur (Ministère du commerce).

M<sup>r</sup> AOUSAT A. Maitre assistant A (E.N.S.A. El Harrach).

Année universitaire 2012-2013

## *Remerciements*

Je remercie tout d'abord Dieu miséricordieux qui m'a donné la force et le courage pour effectuer ce travail.

Au terme de ce modeste travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à **Mr Ferradji Ali**, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, pour m'avoir proposé ce sujet et m'avoir encadré, ainsi que pour le temps qu'il m'a consacré.

Je tiens à remercier vivement **Mr Guezlane L.**, professeur au ministère de l'agriculture, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire de magister.

Mes profonds remerciements à **Mr Aoussat A.**, maître assistant A à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie, et **Mr Bousnadji R.**, docteur au ministère du commerce qui m'ont honoré en acceptant d'examiner ce travail.

Je remercie du fond du cœur **Djamila et Ferial**, pour leur aide, leur orientation et surtout pour le soutien moral qu'elles ont montré durant la réalisation de ce travail.

J'adresse par ailleurs mes remerciements aux techniciens aux laboratoires du département de Technologie Alimentaire : **FatemEzohra, Laarbi, Mohamed** (laboratoire des analyses instrumentales), **Mohamed** (laboratoire de microbiologie), pour leur contribution à la réalisation de ce travail.

Je n'oublierais pas d'exprimer ma gratitude à toute ma famille pour ses encouragements permanents.

# Dédicaces

*Au nom d'Allah Clément miséricordieux*

*Je dédie ce modeste mémoire :*

*A ma mère qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. Sans elle, je n'aurais certainement pas fait d'études longues. Ce mémoire représente donc l'aboutissement du soutien, du sacrifice et des encouragements qu'elle m'a prodigués tout au long de ma scolarité. J'espère qu'elle trouvera dans ce mémoire toute ma reconnaissance et mon amour.*

*A mon cher mari, pour sa compréhension, son respect vis-à-vis de mon objectif et son amour.*

*A mon adorable frère, pour son soutien et sa tendresse.*

*A tous les membres de la famille Boubakeur, pour l'encouragement et le dévouement dont ils ont fait preuve.*

*A la famille Djeha.*

*A mes très chères amies : Iméne, Lili, Nabila, Nawel, Sabrina, Hassina, Lamia, Iméne Titouche. Amina.*

*A mes amis et camarades en post graduation.*

*A tous ceux que j'aime.*

**I. Introduction.....1**

**II . Etude bibliographique**

**Chapitre I : La pomme de terre**

I. Historique.....3  
II. Botanique .....3  
III. Toxicité.....6  
IV. Valeur Nutritionnelle .....7  
V. Caractéristiques de la variété *Spunta*.....8  
VI. Production de la pomme de terre .....9  
    VI.1.Production mondiale .....9  
    VI.2. Production nationale.....10  
VII. La transformation du tubercule de la pomme de terre.....11  
    VII.1 Produits de transformation directe de PDT.....12  
        VII.1.1. Les rondelles de pomme de terre.....12  
            VII.1.1.1 Définition.....12  
            VII.1.1.2 La friture des chips.....13

**Chapitre II : La déshydratation osmotique partielle**

I. Définition.....14  
II. Principe .....14  
III. Cinétique de la déshydratation osmotique .....15  
IV. Principaux facteurs influençant les performances de la DO.....16  
    IV.1. Facteurs liés à l'aliment.....16  
        IV.1.1. Propriétés des tissus biologiques .....16  
        IV.1.2. Le choix du soluté.....17  
        IV.1.3. Découpage de l'aliment .....17

IV.2. Facteurs liés à la solution osmotique.....	17
IV.2.1. Concentration de la solution osmotique .....	17
IV.2.2. Composition de la solution osmotique.....	18
IV.2.3. Température de la solution osmotique.....	18
IV.3. Durée du traitement.....	19
IV.4. Effet de l'agitation sur la DO.....	19
IV.5. Effet du rapport solide/solution.....	19
IV.6. Mode de mise en contact des phases.....	20
IV.7. Mise en œuvre de la déshydratation osmotique.....	20
V. Application de la déshydratation osmotique.....	21
V.1. Pré-traitement thermique.....	21
V.1.1. Le blanchiment .....	21
V.1.2. La congélation.....	22
V.2. Méthodes combinées à la DO.....	22
V.2.1. Imprégnation sous vide.....	22
V.2.2. Haute pression hydrostatique.....	23
V.2.3. Ultrasons.....	23
V.2.4. Irradiation.....	24
V.2.5. Chlorure de sodium.....	24
V.2.6. Centrifugation.....	24
V.2.7. Traitement par champ électrique pulsé.....	25
V.2.8. Stabilisation des produits déshydratés osmotiquement par des traitements physiques.....	25
V.2.8.1. Séchage.....	25
V.2.8.2. Congélation.....	26
VI. Équipements pour la DO.....	27
VII. Qualité des produits végétaux traités par DO.....	27
VII.1. Saveur .....	27
VII.2. Couleur.....	28
VII.3. Texture.....	28
VII.4. Réhydratation.....	28

VII.5. Effet de la déshydratation osmotique sur la composition biochimique .....	29
VIII. Valorisation des fruits conservés en solution sucrés .....	29
IX. Influence du traitement par osmose sur le comportement à la désorption .....	30
X. Différentes méthodes de la déshydratation osmotique .....	30
X.1. La méthode discontinue de la déshydratation osmotique .....	30
X.2. La méthode continue de la déshydratation osmotique.....	30
XI. Intérêt de la déshydratation osmotique .....	30
XII. Aspect économique de la déshydratation osmotique .....	31
XIII. La modélisation du processus de la déshydratation osmotique .....	31
XIII.1. La méthode des plans d'expériences.....	31
XIII.1.1. Méthodologie des surfaces de réponse (MSR) .....	32

### **Chapitre III : Isothermes de sorption**

I. L'état de l'eau dans les aliments .....	33
II. Paramètres de mesure de l'état de l'eau dans les substances biologiques .....	34
II.1. La teneur en eau.....	34
II.2. Activité de l'eau dans un produit .....	35
II.2.1. Méthodes de mesure de l' $A_w$ .....	36
II.2.2. Activité de l'eau et réactions de détérioration des aliments, en particulier à l'état déshydraté.....	37
II.3. Relation entre la teneur en eau et l'activité de l'eau .....	37
II.3.1. Isothermes de sorption .....	37
II.3.1.1. Phénomène de l'hystérésis .....	38
II.3.1.2. Typologie .....	39
II.3.1.3. Les différentes parties de l'isotherme de sorption .....	41
II.3.1.4. Représentation mathématique des isothermes de sorption .....	42
a) Chaleur de sorption .....	42
b) Modèles théoriques d'isothermes.....	42
❖ <i>Modèle B.E.T</i> .....	43
❖ <i>Modèle G.A.B</i> .....	43

II.3.1.5. Intérêt pratique des isothermes de sorption pour la technologie alimentaire.....	44
--	----

### III .Etude expérimentale

#### Matériels et méthodes

I. Matériel végétal .....	46
II. La déshydratation osmotique de la pomme de terre.....	46
II.1. Matériel technique.....	46
II.1.1. Détermination du taux d'humidité .....	46
II.1.2. Thermoanémomètre .....	46
II.2. Protocol expérimental.....	46
II.2.1. Préparation des solutions osmotiques .....	46
II.2.2. Préparation des échantillons.....	46
II.2.3. Les prétraitements utilisés .....	47
II.3 Cinétique de la déshydratation osmotique partielle en continu.....	48
II.3.1. La modélisation mathématique de la cinétique de la déshydratation osmotique partielle en continue selon AZUARA et al., (1998).....	48
II.3.2. La modélisation des surfaces de réponse .....	51
II.3.2.1. Le design expérimental.....	51
II.3.2.1.1 Analyse de la variance.....	51
❖ Hypothèse à tester.....	52
❖ Décomposition de la variance.....	52
❖ Test de Fisher.....	53
III. Isotherme de désorption .....	54
III.1. Objectif.....	54
III.2 Principe .....	54
III.3. Dispositif expérimental et méthodologie.....	55
III.4. Détermination de l'isotherme de désorption .....	55
III.5. L'application des modèles mathématiques .....	57
III .6. Calcul de l'énergie nécessaire pour évaporer l'eau .....	58
IV. Friture de pomme de terre.....	59
IV.1 Principe.....	59

IV.2. Fabrication des chips de pomme de terre.....	59
IV.2.1. Matériel technique .....	59
IV.2.2. Protocole expérimental.....	59

## **Résultats et discussion**

I. La déshydratation osmotique partielle de la pomme de terre dans une solution saline.....	61
I.1. Cinétique de la perte en poids, la perte en eau et le gain de solide au cours de la déshydratation osmotique.....	61
I.2. Modélisation de la cinétique de la déshydratation osmotique selon le modèle mathématique proposé par AZUARA et al. (1998) .....	63
I.3. Optimisation de la déshydratation osmotique des pommes de terre par la Méthodologie de Surface de Réponse .....	66
I.3.1. L'analyse statistique.....	66
I.3.2. Analyse de la variance (ANOVA) de l'effet des différents paramètres sur les réponses.....	67
I.3.2.1. Ajustement du modèle.....	67
I.3.2.2. La perte en poids.....	69
I.3.2.3. Perte en eau.....	72
I.3.2.4. Gain de solide.....	75
I.3.3. Conditions optimales de la déshydratation osmotique des cubes de pomme de terre dans une solution saline.....	77
I.4. Optimisation de la déshydratation osmotique des cubes de pomme de terre dans une solution de saccharose concentrée par la Méthodologie de Surface de Réponse.....	78
I.4.1 L'analyse statistique.....	78
I.4.2. Analyse de la variance (ANOVA) de l'effet des différents paramètres sur les réponses.....	79
I.4.2.1. Ajustement du modèle.....	79
I.4.2.2. La perte en poids .....	79
I.4.2.3. La perte en eau.....	82
I.4.2.4. Le gain de solide.....	84



I.4.3. Conditions optimales de la déshydratation osmotique des cubes de pomme de terre dans une solution de saccharose.....	87
I.5. Optimisation de la déshydratation osmotique des rondelles de pomme de terre dans une solution de saccharose concentrée par la Méthodologie de Surface de Réponse .....	87
I.5.1. L'analyse statistique.....	87
I.5.2. Analyse de la variance (ANOVA) de l'effet des différents paramètres sur les réponses.....	88
I.5.2.1. Ajustement du modèle.....	88
I.5.2.2. La perte en poids.....	89
I.5.2.3. La perte en eau.....	91
I.5.2.4. Le gain de solide.....	94
I.5.3. Conditions optimales de la déshydratation osmotique des rondelles de pomme de terre dans une solution de saccharose.....	97
II. Influence de la forme géométrique sur la DO des PDT.....	97
III. Les isothermes de sorption des pommes de terre.....	97
III.1. Détermination expérimentale des isothermes de désorption des PT déshydratées partiellement par osmose à 40 et 60°C.....	97
III.2. Courbes des isothermes de désorption .....	98
III.2.1. Effet de la température.....	99
III.3. Modélisation mathématique des isothermes de désorption.....	100
III.3.1. Paramètres du modèle de GAB.....	100
III.3.2. Ajustement des valeurs expérimentales au modèle de GAB.....	102
III.3.3. Calcul de la chaleur de sorption de la couche monomoléculaire et la multicouche .....	103
IV. Friture des chips de pomme de terre.....	105
IV.1. La qualité organoleptique des chips.....	106
<b>III. Conclusion.....</b>	<b>107</b>
<b>IV. Références bibliographiques .....</b>	<b>110</b>
<b>V. Annexes.....</b>	<b>122</b>

## *Liste des abréviations*

$a_w$  : activité de l'eau

°B : degré Brix

°C : degré Celsius

Cm : centimètre

DO : déshydratation osmotique

GS : gain de solide

HRE : humidité relative de l'air à l'équilibre

K : kilogramme

Kv : kilovolt

NaCl : chlorure de sodium

PAI : produits à humidité intermédiaire

PDT : pomme de terre

PE : perte en eau

PP : perte en poids

RMN : résonance magnétique nucléaire

$R^2$  : coefficient de régression

V : volt

## *Liste des tableaux*

Tableau n°1 : Classification de la pomme de terre

Tableau n°2 : Les constituants minéraux de la pomme de terre pour 100 g de pomme de terre à l'eau (Anonyme, 2001a).

Tableau n°3 : Les constituants organiques de la pomme de terre pour 100 g de pomme de terre à l'eau (Anonyme, 2000b).

Tableau n°4 : Les principaux pays producteurs de pomme de terre (FAOSTAT, 2008)

Tableau n°5 : Valeurs de l' $a_w$  de solution d'acide sulfurique en fonction de la concentration (% volume/volume) et de la température (Multon et al., 1980).

Tableau n°6 : Les niveaux des différentes variables du processus de la déshydratation osmotique des cubes de pomme de terre dans une solution saline.

Tableau n°7: Les conditions expérimentales et les réponses obtenues par la MSR

Tableau n°8: Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques  
Modèle pour la perte en poids, de la pomme de terre lors de la déshydratation osmotique.

Tableau n°9 : Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques.  
Modèle pour la perte en eau

Tableau n°10 : Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques.  
Modèle pour le gain de solide

Tableau n°11 : Les niveaux des différentes variables du processus de la déshydratation osmotique des cubes de pomme de terre dans une solution de saccharose.

Tableau n°12 : Les conditions expérimentales et les réponses obtenues par la MSR

Tableau n°13 : Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques.  
Modèle pour la perte en poids

Tableau n°14 : Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques.  
Modèle pour la perte en eau

Tableau n°15 : Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques.

Modèle pour le gain de solides

Tableau n°16 : Les niveaux des différentes variables du processus de la déshydratation osmotique des rondelles de pomme de terre dans une solution de saccharose.

Tableau n° 17 : Les conditions expérimentales et les réponses obtenues par la MSR

Tableau n°18: Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques.

Modèle pour la perte en poids

Tableau n°19 : Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques.

Modèle pour la perte en eau

Tableau n°20: Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques.

Modèle pour le gain de solides

Tableau n° 21: Teneurs en eau à l'équilibre  $X_{eq}$  (g d'eau /100g de matière sèche) pour l'isotherme de désorption de la pomme de terre

Tableau n° 22 : Constantes de l'équation de GAB à trois paramètres.

Tableau n° 23 : Constantes de l'équation de GAB à cinq paramètres.

Tableau n° 24 : Les teneurs en eau expérimentales et prévues d'après le modèle GAB.

Tableau n° 25: Valeurs de P (%) et SCM (%) calculées pour le modèle GAB.

Tableau n° 26: Chaleurs de désorption de la couche monomoléculaire et de la multicouche

Tableau n° 27: durée de friture des chips de pomme de terre

Tableau n°28 : Les principales maladies de la pomme de terre

Tableau N°29 : Variétés de pomme de terre

## Liste des figures

Figure n°1 : Les différentes parties de la plante de pomme de terre

Figure n°2 : Coupe longitudinale d'un tubercule de pomme de terre

Figure n°3 : Tubercule de pomme de terre variété *Spunta*

Figure n°4 : La production mondiale de la pomme de terre 1991-2007

Figure n°5 : Production nationale de la pomme de terre (qx)

Figure n°6: Représentation schématique de flux de transfert de matière dans un système végétal /liquide.

Figure n°7 : Les différents systèmes de mise en contact des phases (solution osmotique et l'aliment) pour une déshydratation osmotique.

Figure n°8 : Représentation graphique de l'activité de l'eau.

Figure n°9 : Vitesse de détérioration des aliments en fonction de l'activité d'eau

Figure n°10 : Isotherme de sorption illustrant le phénomène d'hystérésis.

Figure n°11: Différents types d'isothermes de sorption.

Figure n°12 : Représentation graphique des différentes parties de l'isotherme de sorption.

Figure n°13 : Rondelles et cubes de pomme de terre avant la déshydratation osmotique

Figure n°14: Dispositif utilisé pour la déshydratation osmotique.

Figure n°15: Dispositif expérimental de détermination des isothermes de désorption.

Figure n°16: Rondelles de pomme de terre avant la friture

Figure n°17: Evolution de la PP, PE et le GS en fonction du temps des cubes de pomme de terre déshydratés à 20°C et 5% de sel

Figure n°18: Evolution de la PP, PE et le GS en fonction du temps des cubes de pomme de terre déshydratés à 60°C et 60°Brix.

Figure n°19: Evolution de la PP, PE et le GS en fonction du temps des rondelles de pomme de terre déshydratés à 40°C et 50°Brix.

Figure n°20: Variation de t/PP en fonction du temps des cubes de pomme de terre déshydratés à 20°C et à une concentration en sel de 10% pendant 300min.

Figure n°21: Variation de t/PP en fonction du temps des cubes de pomme de terre déshydratés à 60°C et à une concentration en sel de 10% pendant 300min.

Figure n°22: Variation de t/PP en fonction du temps des cubes de pomme de terre déshydratés à 20°C et à une concentration en saccharose de 40°Brix pendant 300min.

Figure n°23: Variation de t/PP en fonction du temps des cubes de pomme de terre déshydratés à 60°C et à une concentration en saccharose de 40°Brix pendant 300min.

Figure n°24: Variation de t/PP en fonction du temps des rondelles de pomme de terre déshydratés à 20°C et à une concentration en saccharose de 60°Brix pendant 150min.

Figure n° 25: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la température sur la PP des cubes de PDT déshydratés dans une solution salée.

Figure n°26: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la concentration en sel et de la température sur la PP des cubes de PDT déshydratés dans une solution salée.

Figure n° 27 : Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la concentration en sel et du temps sur la PP des cubes de PDT déshydratés dans une solution salée .

Figure n° 28: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la température sur la PE des cubes de PDT déshydratés dans une solution salée.

Figure n° 29: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la concentration en sel et de la température sur la PE des cubes de PDT déshydratés dans une solution salée.

Figure n° 30: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la concentration en sel et du temps sur la PE des cubes de PDT déshydratés dans une solution salée.

Figure n° 31: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la température sur le GS des cubes de PT déshydratés dans une solution salée.

Figure n° 32: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la température et la concentration en sel sur le GS des cubes de PDT déshydratés dans une solution salée.

Figure n° 33: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la concentration en sel sur le GS des cubes de PDT déshydratés dans une solution salée.

Figure n° 34: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la température sur la PP des cubes de PDT déshydratés dans une solution de saccharose.

Figure n° 35: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la température et de la concentration en saccharose sur la PP des cubes de PDT déshydratés dans une solution de saccharose.

Figure n° 36: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la concentration en saccharose sur la PP des cubes de PDT déshydratés dans une solution de saccharose.

Figure n° 37: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la température sur la PE des cubes de PDT déshydratées dans une solution de saccharose.

Figure n° 38: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la température et de la concentration en saccharose sur la PE des cubes de PDT déshydratés dans une solution de saccharose.

Figure n° 39: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la concentration en saccharose sur la PE des cubes de PDT déshydratés dans une solution de saccharose.

Figure n° 40: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la température et du temps sur le GS des cubes de PDT déshydratés dans une solution de saccharose.

Figure n° 41: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la température et de la concentration en saccharose sur le GS des cubes de PDT déshydratés dans une solution de saccharose.

Figure n° 42: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la concentration en saccharose sur le GS des cubes de PDT déshydratés dans une solution de saccharose.

Figure n° 43: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la température sur la PP des rondelles de PDT déshydratées dans une solution de saccharose.

Figure n° 44: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la température et de la concentration en saccharose sur la PP des rondelles de PDT déshydratées dans une solution de saccharose.

Figure n° 45: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la concentration en saccharose sur la PP des rondelles de PDT déshydratées dans une solution de saccharose.

Figure n° 46: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la température sur la PE de rondelles de PDT déshydratées dans une solution de saccharose.

Figure n° 47: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la température et la concentration en saccharose sur la PE des rondelles de PDT déshydratées dans une solution de saccharose.

Figure n° 48: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la concentration en saccharose sur la PE des rondelles de PDT déshydratées dans une solution de saccharose.

Figure n° 49: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la température sur le GS des rondelles de PDT déshydratées dans une solution de saccharose.

Figure n° 50: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la température et la concentration en saccharose sur le GS des rondelles de PDT déshydratées dans une solution de saccharose.

Figure n° 51: Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la concentration en saccharose sur le GS des rondelles de PDT déshydratées dans une solution de saccharose.

Figure n° 52 : Isotherme de désorption à 40°C et 60°C pour la pomme de terre

Figure n° 53: Chips de pomme de terre

Figure n°54 : Représentation graphique des valeurs des pourcentages de la perte en poids prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des cubes de PDT dans une solution saline.

Figure n°55 : Représentation graphique des valeurs des pourcentages du GS prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des cubes de PDT dans une solution saline.

Figure n°56 : Représentation graphique des valeurs des pourcentages de la PE prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des cubes de PDT dans une solution saline.

Figure n°57 : Représentation graphique des valeurs des pourcentages de la PP prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des cubes de PDT dans une solution de saccharose.

Figure n°58 : Représentation graphique des valeurs des pourcentages du GS prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des cubes de PDT dans une solution de saccharose.

Figure n°59 : Représentation graphique des valeurs des pourcentages de la PE prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des cubes de PDT dans une solution de saccharose.

Figure n°60 : Représentation graphique des valeurs des pourcentages de la PP prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des rondelles de PDT dans une solution de saccharose.

Figure n°61 : Représentation graphique des valeurs des pourcentages du GS prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des rondelles de PDT dans une solution de saccharose.

Figure n°62 : Représentation graphique des valeurs des pourcentages de la PE prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des rondelles de PDT dans une solution de saccharose.



## **1. INTRODUCTION**

La pomme de terre a longtemps été considérée comme une simple racine sans goût ni saveur. Aujourd'hui, c'est l'un des aliments de base de notre alimentation, mais il lui a fallu des siècles pour qu'elle soit reconnue.

En Algérie, la production de la pomme de terre a connu un essor remarquable ces dernières années. En 2011, elle a atteint 3,8 millions de tonnes, contre 3,2 millions en 2010 et 2,67 millions en 2009 (**Djouadi F., 2012**).

Les pommes de terre ne sont pas uniquement cultivées pour une consommation ménagère immédiate, mais elles servent de plus en plus de matière première pour l'industrie de transformation agroalimentaire.

A l'heure actuelle, la progression de cette industrie s'est accrue pour répondre à la demande croissante de l'industrie du fast-food, des snacks et des aliments tout préparés. Cet essor s'explique principalement par l'accroissement de la population urbaine, la diversification des régimes alimentaires et des modes de vie qui laissent moins de temps pour la préparation du produit frais.

Les industriels du secteur agro-alimentaire sont aujourd'hui confrontés à deux problèmes majeurs : d'une part l'attente croissante des consommateurs pour des produits de hautes qualités nutritionnelles et organoleptiques et, d'autre part, l'augmentation des coûts énergétiques. En réponse à ces défis, les techniques de stabilisation et de conservation des aliments, tels que le séchage ou les techniques du froid, connaissent des améliorations remarquables, et sont de mieux en mieux intégrées aux filières industrielles.

Une catégorie de méthodes de séchage fait intervenir une ou plusieurs étapes de mise en contact des denrées avec une solution aqueuse concentrée en sels (ex. saumurage des légumes, viandes, poissons ou fromages), en acide (ex. marinage des produits carnés) ou en sucres (confisage et semi-confisage des fruits). Ce traitement vise à réduire, à moindre coût, le risque d'altération de la qualité nutritionnelle et organoleptique du produit traité (**Ade-Omowaye et al., 2003**).

Le procédé de déshydratation osmotique est largement utilisé pour l'élimination de l'eau du légume, pour obtenir un produit d'humidité intermédiaire, ou comme un prétraitement

avant la mise en place d'un processus supplémentaire (**Lenart, 1996 ; Torregiani et Bertolo, 2004**). Il permet de réduire la charge microbienne, et ainsi de prolonger la période de conservation des produits (**Castello et al., 2009**).

La bonne connaissance du caractère hygroscopique d'un matériau est une des clés de la bonne appréciation des processus de séchage. En effet, un matériau est séché pour être ensuite utilisé pour une application particulière nécessitant généralement une teneur en eau précise liée à la stabilité du produit. Dans le domaine hygroscopique, où l'eau qui se déplace n'est plus qu'eau liée ou vapeur d'eau, il existe une relation macroscopique entre la teneur en eau d'équilibre du produit et le milieu environnant.

Les isothermes de sorption lient la teneur en eau d'équilibre, pour une température donnée, et l'humidité relative de l'environnement entourant le produit (**Chen et Morey, 1989**), ils sont d'une grande importance dans l'industrie agro alimentaire et notamment dans les opérations de séchage solaire, de stockage et de conservation des aliments.

En Algérie, il n'existe aucune industrie de transformation des pommes de terre utilisant le procédé de déshydratation osmotique, ainsi, pour contribuer à l'intégration de cette technique de conservation, que s'est défini le thème de notre travail, qui porte sur l'optimisation du procédé de la déshydratation osmotique partielle des pommes de terre dans deux solutions osmotiques (sucrée et salée) par le *design expérimental* en étudiant l'influence du temps, de la température et de la concentration de la solution d'osmose sur le transfert de masse.

La cinétique de transfert de masse est étudiée en appliquant le modèle mathématique proposé par **AZUARA et al. (1992)** pour la prédiction de la perte en eau, la perte en poids et le gain en solide au cours de la déshydratation osmotique.

Pour prouver l'efficacité de la déshydratation osmotique, nous avons réalisé un test de friture des rondelles de pomme de terre pour déterminer la durée de cuisson.

Dans le but d'évaluer l'interaction entre l'eau et les constituants de la pomme de terre, les isothermes de désorption du produit déshydraté par osmose ont été déterminés.

# Chapitre I

## La pomme de terre

### I. Historique

La pomme de terre existe depuis plus de 8 000 ans. D'après les recherches réalisées, l'Amérique du Sud serait la terre natale de ce légume. Au XVI<sup>ème</sup> siècle, à la recherche de trésors et du pays d'Eldorado, les conquérants espagnols ont découvert la pomme de terre dans les potages des indigènes. Dès lors, le précieux légume entrepris son périple vers l'Europe (**Anonyme, 2000a**). Il était introduit en Italie et en Espagne à la fin du XVI<sup>ème</sup> siècle, ensuite il atteint l'Angleterre, puis gagne l'Irlande. Dès le milieu du XVII<sup>ème</sup> siècle, il est bien connu en Allemagne et de là, se propage vers l'est, suivant les colonies allemandes qui s'enfoncent dans les pays slaves et vers l'ouest, dans le pays de Montbéliard, la Franche-Comté et l'Alsace. Au début du XVIII<sup>ème</sup> siècle, la plante fut introduite en Amérique du Nord (**Anonyme, 2004a**).

En Algérie, la pomme de terre a probablement été introduite pour la première fois au XVI<sup>ème</sup> siècle par les Maures andalous qui ont propagé d'autres cultures dans la région : la tomate, le poivron, le maïs, le tabac... puis, elle est tombée dans l'oubli n'ayant pas suscité d'intérêt. Dans la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle, les colons l'avaient cultivé pour leur usage, car les algériens y sont restés indifférents malgré les disettes successives. C'est la dernière grande famine des années 30/40 qui est venue à bout de cette opposition (**Meziane, 1991**).

### II. Botanique

L'espèce cultivée actuellement dans notre région est une sous-espèce (tétraploïde  $2n=48$ ) dérivant d'une autre sous-espèce *spp.andigena* par sélection au fil des siècles pour l'adaptation au jour long (**Rousselle et al., 1992**). La plante est une espèce herbacée vivace par ces tubercules mais cultivée en culture annuelle selon **Rousselle et al., (1996)**.

**Tableau n°1 :** Classification de la pomme de terre

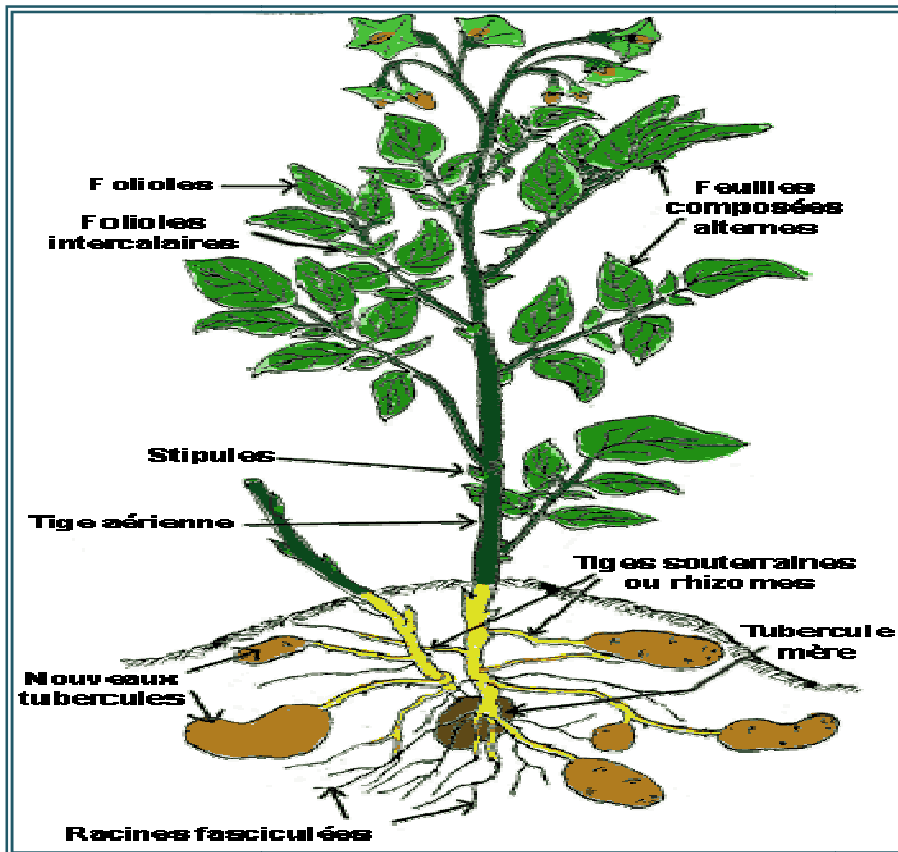
Règne	<i>Plantae</i>
Sous-règne	<i>Tracheobionta</i>
Division	<i>Magnoliophyta</i>
Classe	<i>Magnoliopsida</i>
Sous-classe	<i>Asteridae</i>
Ordre	<i>Solanales</i>
Famille	<i>Solanaceae</i>
Sous-famille	<i>Solanoideae</i>
Genre	<i>Solanum</i>
Espèce	<i>Solanum tuberosum</i>

La plante est constituée de deux parties :

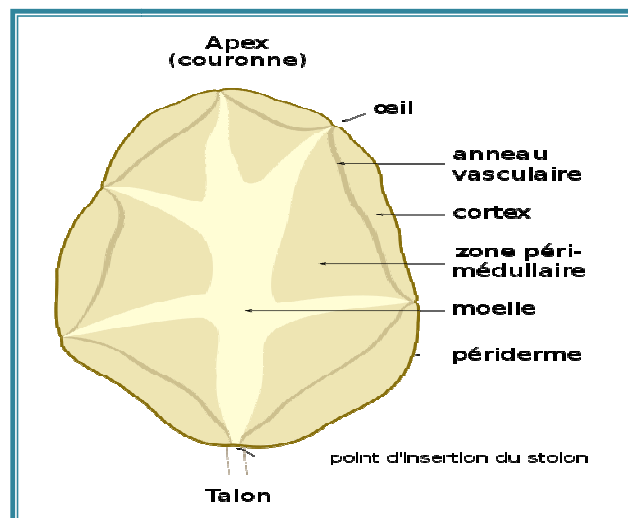
➤ **Une partie aérienne :** avec des tiges prostrées ou dressées, mesurant au plus un mètre, les feuilles sont oblongues et pointues, les fleurs ont une couleur variante du blanc au violet, les fruits sont des baies de la taille d'une cerise, plus ou moins grosses, charnues, lisses, largement aplaties et sillonnées de deux cotés, celles-ci contiennent un grand nombre de petites graines, lenticulaires blanches attachées à un placenta hémisphérique et enveloppées d'une substance pulpeuse, comme les tiges et les feuilles, les fleurs contiennent une quantité significative de solanine , un alcaloïde toxique caractéristique du genre *Solanum* (**Bruton ,1998**). Cette partie de la plante permet une reproduction sexuée.

➤ **Une partie souterraine :** La plante comporte à la fois des tiges aériennes et des tiges souterraines (**Darpoux et Delelly, 1967**), et porte aussi des racines nombreuses, fines et fasciculées qui peuvent pénétrer profondément dans le sol s'il est suffisamment meuble (**Soltner, 2005**). Cette partie porte aussi des tubercules : C'est l'organe le plus intéressant de la plante, qui confère à la pomme de terre sa valeur alimentaire (**LÊ et al ., 2002**).

*Etude bibliographique*  
*Chapitre 1 : La pomme de terre*



**Figure n°1 :** Les différentes parties de la plante de pomme de terre





**Figure n°2 :** Coupe longitudinale d'un tubercule de pomme de terre

Le tubercule n'appartient pas à la racine de la plante, mais à sa tige enterrée qui part des rameaux plus grêles appelés rhizomes, à l'extrémité desquels se forment les tubercules. À la surface de ces derniers se trouvent les « yeux », ou bourgeons, qui ont la particularité d'être disposés de façon hélicoïdale. Ces yeux se transforment en germes après une période plus ou moins longue de repos ( **Faiguenbaum H., 1988** ). Il comporte une forte proportion d'eau, pouvant aller jusqu'à 80 %, ainsi que des matières amylacées (la féculé), du sucre, des matières albuminoïdes, des fibres cellulosiques, des éléments minéraux, des diastases et des vitamines (principalement la vitamine C qui est surtout présente dans la peau) et des toxines. Les fleurs, groupées en cymes, comportent cinq sépales et cinq pétales soudés formant une sorte de roue à cinq pointes. Elles sont généralement blanches ou mauves, mais parfois aussi bleues, pourpres ou violet foncé. (**Arvy Marie Pierre et Gallouin François, 2007**).

### **III. Toxicité**


Comme c'est souvent le cas pour les Solanacées, par exemple les tomates, la pomme de terre contient différentes toxines, surtout dans les parties vertes, ainsi que dans les fleurs et les bourgeons : il n'est pas d'usage de consommer les tiges et les feuilles (qui ont pu servir dans des périodes difficiles comme substitut du tabac) mais il faut s'abstenir de consommer les tubercules lorsque ceux-ci présentent des parties vertes, car on risque alors de s'intoxiquer. C'est pour cette raison que les pommes de terre doivent toujours être conservées à l'obscurité. En outre, le fruit est très toxique, cas de la plupart des espèces du genre *Solanum*, comme la morelle noire ou la douce-amère.

 La principale de ces toxines est un **glycoalcaloïde**, la solanine, qui est présente aussi dans le tubercule à des doses faibles (moins de 10 mg pour 100 g) et est concentrée surtout dans la peau, d'où l'intérêt de l'épluchage. Lorsque la concentration est plus élevée, c'est le cas chez certaines variétés, cela donne un goût amer au tubercule. La solanine n'est pas éliminée habituellement par la cuisson car elle n'est détruite par la chaleur qu'au-delà de 243°C. L'ingestion de solanine provoque rarement la mort mais peut causer des hémorragies, notamment à la rétine (**Singh Jaspreet et al., 2009**) ;

 La pomme de terre contient aussi des **inhibiteurs de protéinase** capables d'inhiber les principales protéinases digestives des animaux, notamment la trypsine, la chymotrypsine. Ces substances qui jouent un rôle dans la défense de la plante contre certains ravageurs, insectes

ou microorganismes, sont détruites par la cuisson. **Les lectines** sont des protéines capables de se lier de manière réversible à des mono- ou oligosaccharides.

Cette propriété permet aux lectines d'agglutiner les hématies de diverses espèces de mammifères dont l'homme et de probablement perturber le bon fonctionnement du tube digestif des insectes se nourrissant de la plante, jouant ainsi un rôle dans la défense de cette plante contre les insectes. Ces molécules sont également thermolabiles (FAO, 1991) ;

 Par la réaction de Maillard, la friture des pommes de terre peut entraîner la formation **d'acrylamide** (substance irritante, toxique et potentiellement cancérigène) qui donne aux frites et aux chips une couleur foncée. Elle résulte de la dégradation de l'asparagine en présence de sucres réducteurs dans les tubercules (Anonyme, 2010 ; Varoujan A. Yaylayan, Wnorowski Andrzej, and Perez Locas Carolina, 2003). Pour limiter la formation d'acrylamide, on peut contrôler la cuisson en évitant les températures trop élevées (au-dessus de 175 °C) et les temps de cuisson trop longs et minimiser la teneur des pommes de terre en sucres réducteurs (au-dessous d'un seuil estimé à 1 g/kg). Une température de stockage trop basse favorise le développement de l'acrylamide sur le tubercule (Fiwap, 2007).



#### **IV. Valeur Nutritionnelle**

Dans sa présentation la plus simple, la pomme de terre apporte des principes nutritifs qui en font un produit presque indispensable à notre alimentation, et la base du régime alimentaire de plusieurs groupes culturels. C'est un aliment polyvalent, riche en hydrates de carbone, très populaire dans le monde entier. Fraîchement cueillie, la pomme de terre contient environ 80 pour cent d'eau et 20 pour cent de matière sèche, dont 60 à 80 pour cent environ d'amidon. Sa teneur en protéines (en poids sec) est semblable à celle des céréales et très élevée par rapport aux autres racines et tubercules. En outre, la pomme de terre est pauvre en lipides (Anonyme, 2000b).

C'est un légume riche en micronutriments, en particulier en vitamine C consommée avec sa peau, une pomme de terre de taille moyenne de 150 g couvre près de la moitié des besoins quotidiens d'un adulte (100 mg). C'est une source modérée de fer et sa forte teneur en vitamine C en favorise l'absorption.

Les pommes de terre renferment des antioxydants, utiles dans la prévention des maladies liées au vieillissement, et des fibres alimentaires, essentielles au métabolisme.

Leur valeur calorique est modeste, s'établissant entre 80 et 90 kcal (334 à 376 kJ) pour 100 g de pommes de terre.

**Tableau n°2** : Les constituants minéraux de la pomme de terre pour 100 g de pomme de terre à l'eau (**Anonyme, 2001a**).

Calcium	10 mg
Phosphore	50 mg
Magnesium	25 mg
Potassium	450 mg

**Tableau n°3** : Les constituants organiques de la pomme de terre pour 100 g de pomme de terre à l'eau (**Anonyme, 2000b**).

Protéine	2000 mg
Amidon	15000 à 16000 mg
Sucres	500 mg
Lipides	100 mg

**Vitamine B** : Comme tous les aliments faisant partie des féculents, la pomme de terre contient des quantités notables en vitamines du groupe B.

**Vitamine C** : elle en contient de 5 mg à 10 mg. La teneur en vitamine C dépend de la maturité de la pomme de terre. Plus on la conserve longtemps, plus sa vitamine C diminue (**Anonyme, 2001a**).

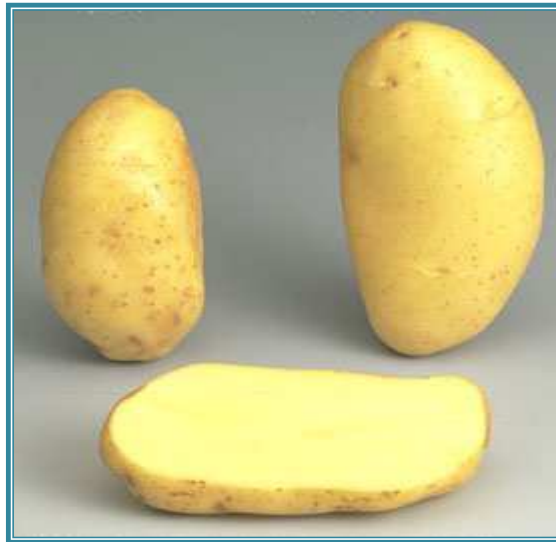
**Fibres** : La pomme de terre en apporte environ 2 g par ration de 100 g, ce qui équivaut à 15% des besoins quotidiens de fibres. Ce pourcentage peut se situer entre 20 et 25 % si la peau est consommée (**Anonyme, 2000b**).

## **V. Caractéristiques de la variété *Spunta***

La *Spunta* est une variété de pomme de terre cultivée d'origine néerlandaise, aux tubercules à peau jaune de grande taille et de forme allongée, d'utilisation assez polyvalente



en cuisine ( **GNIS, 2011**). Elle est très cultivée dans les pays méditerranéens (Maghreb, Algérie, Égypte) pour la production de pommes de terre nouvelles exportées vers l'Europe (**FIWAP, 2011**). C'est une plante au port dressé, assez haute. Les fleurs, relativement abondantes, sont de couleur blanche, avec parfois une légère coloration à la face inférieure de la corolle. La fructification est rare.



**Figure n°3 :** Tubercule de pomme de terre variété *Spunta*

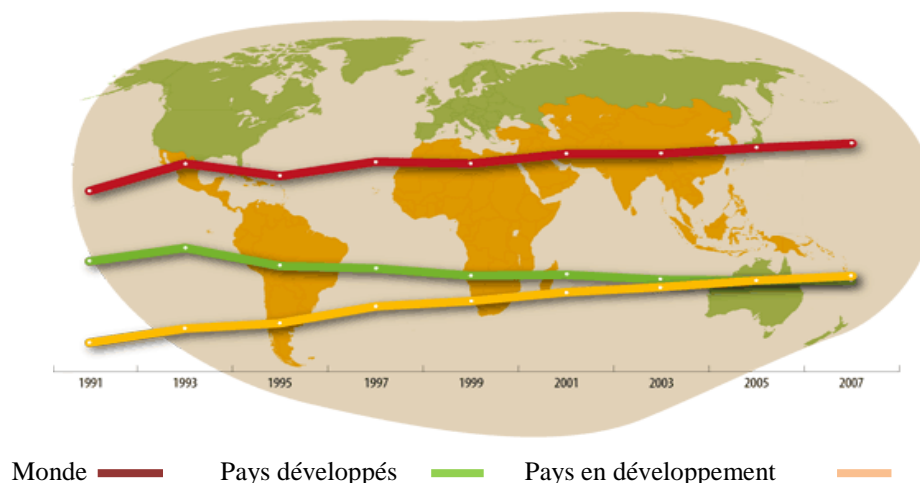
Les tubercules, très gros, réguliers, ont une forme allongés. Ils ont une peau jaune et lisse, aux yeux très superficiels, et la chair jaune pâle. Les germes très grands sont colorés (anthocyanes).Le rendement est élevé, avec une teneur en matière sèche moyenne. Relativement résistante à la chaleur et à la sécheresse, c'est une variété qui s'adapte bien à la culture dans les pays chauds. Son point faible est sa sensibilité au mildiou.

## **VI. Production de la pomme de terre**

### **VI.1.Production mondiale**

Le secteur de la pomme de terre est en pleine évolution. Jusqu'au début des années 90, la plupart des pommes de terre étaient cultivées et consommées en Europe, en Amérique du Nord et dans les pays de l'ex-Union Soviétique. Depuis lors, la production et la demande de pomme de terre ont enregistré une forte croissance en Asie, en Afrique et en Amérique latine, où la production est passée de moins de **30** millions de tonnes au début des années 60 à plus de **100** millions de tonnes au milieu des années 90. En 2005, pour la première fois, la production de la pomme de terre du monde en voie de développement a atteint **161,5** millions

de tonnes environ, ce qui a dépassé celle du monde développé (**155,9** millions de tonnes). La Chine est devenue le premier producteur mondial de pommes de terre, et quasiment un tiers de tous les tubercules sont désormais récoltés en Chine et en Inde (**Anonyme, 2007**).



**Figure n°4 :** La production mondiale de la pomme de terre 1991-2007

(FAOSTAT, 2008)

Pays	Quantité (tonnes)
<b>Chine</b>	72 040 000
<b>Féd- de Russie</b>	36 784 200
<b>Inde</b>	26 280 000
<b>Etats-Unis</b>	20 373 267
<b>Ukraine</b>	19 102 300
<b>Pologne</b>	11 643 769
<b>Allemagne</b>	11 604 500
<b>Belarus</b>	8 743 976
<b>Pays-Bas</b>	7 200 000
<b>France</b>	6 271 000

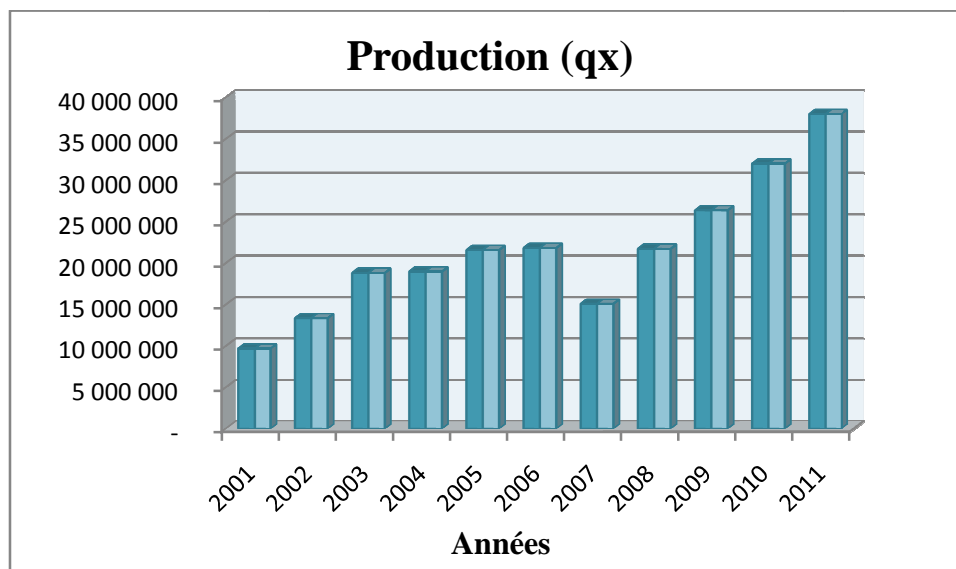
**Tableau n°4 :** Les principaux pays producteurs de pomme de terre

(FAOSTAT, 2008)

## VI.2. Production nationale

La pomme de terre est l'un des produits les plus importants pour l'alimentation de la population algérienne : elle occupe la deuxième place après le blé. La production en

Algérie est en évolution (Figure n°5), en 2011, on a noté des niveaux de production jamais atteints par le passé : **3,8** millions de tonnes.



**Figure n°5** : Production nationale de la pomme de terre (qx)  
(Ministère de l’agriculture, 2011)

L’Algérie avec l’Egypte, l’Afrique du sud et le Maroc présentent 80% de la production de pomme de terre en Afrique (CIP1, 1999).

## **VII. La transformation du tubercule de la pomme de terre**

Les pommes de terre ne sont pas uniquement cultivées pour une consommation immédiate, mais elles servent de plus en plus de matière première pour l’industrie de transformation. D’une part, le consommateur est très exigeant sur la qualité, une réalité dont le producteur doit tenir compte. D’autre part, l’industrie de transformation pose des critères stricts car elle doit offrir un produit présentant un bon rapport qualité-prix. Les frites, les chips, les flocons et la féculé de pomme de terre doivent répondre à des cahiers des charges parfaitement définis. Les aspects tels que la longueur, la couleur, la teneur en graisse ou en matière sèche doivent être bien contrôlés. Par ailleurs, la qualité des pommes de terre dépend de divers facteurs externes comme le climat, la nature du sol, la variété, les méthodes de production, les conditions de récolte et de stockage. Le producteur agricole devra, à travers l’application des bonnes pratiques culturales et la formation de ses employés, influencer efficacement ces aspects afin de pouvoir fournir à chaque instant, une matière première

de haute qualité, arrivée à maturité, et qui répond au cahier des charges (**Haverkort M. A.J. , van Loon M. C.D. et al.2001**).

## **VII.1 Produits de transformation directe de PDT**

Pendant la seconde guerre mondiale, les Américains ont développé des techniques de fabrication industrielle de chips, de purée en flocons, de pomme de terre pré-épluchée, ...Aussi au cours de ces 20 dernières années, l'industrie alimentaire a mis au point des aliments « services ». En effet, l'aliment vendu à la ménagère associe l'aliment-denrée à la prestation de service. C'est ainsi que les pommes de terre se retrouvent sous des formes très variées, citées auparavant (**Gaucher Isabelle, Lusson Julien, 2001**).

En fait, selon le type de préparation, les produits transformés peuvent être classés en 4 catégories :

- ❖ Les produits déshydratés (poudre, flocons)
- ❖ Les produits frits déshydratés ou séchés (chips)
- ❖ Les produits surgelés (frites, gratin, pommes noisette ou dauphine)
- ❖ Les produits appertisés (cuits ou stérilisés en boîtes, en bocaux, en sachets en matière plastiques).

### **VII.1.1. Les rondelles de pomme de terre**

#### **VII.1.1.1 Définition**

Les rondelles ou chips (connus aussi sous le nom de croustilles au Québec et au Canada officiellement mais couramment appelés « chips ») sont des fines tranches végétales assaisonnées de sel ou d'autres condiments et frites dans l'huile. Fabriquées de manière industrielle, elles sont vendues en sachet plastique, Il existe aussi des chips reconstituées, fabriqués à partir de pommes de terre déshydratées.

Les chips sont une nourriture de grignotage servie en apéritif. Elles sont massivement consommées dans les pays anglo-saxons (États-Unis, Royaume-Uni...), et sont communes dans la plupart des pays occidentaux et dans bien d'autres pays du monde (**OQLF, 2001**).

### **VII.1.1.2 La friture des chips**

La friture est l'un des plus anciens procédés de l'élaboration des aliments. Elle peut être réalisée à la poêle en présence de très peu de matières grasses (friture plate) ou dans un grand volume d'huile ou de matière grasse (friture profonde). Aujourd'hui, le procédé de friture absorbe la majorité des huiles alimentaires produites dans le monde, et des produits frits sont consommés sur tous les continents. Ces dernières décennies, l'évolution de nos modes de vie (éloignement du lieu de travail, restauration hors foyer, alimentation «déstructurée », «alimentation plaisir» ont contribué à la diversification des produits frits tant la restauration collective (pommes frites, poissons ou poulets frits) que dans l'industrie du grignotage ou de la restauration rapide (chips, produits soufflés, etc...) (**Gertz C. 2000**).

#### **a) Principes de base et d'application du procédé de friture**

La friture des pommes de terre est principalement utilisée pour réaliser des transformations qui augmentent :

- ✓ la digestibilité de l'aliment en facilitant sa trituration et son assimilation dans le tractus (coagulation des protéines et de l'amidon) ;
- ✓ la palatabilité de l'aliment par le développement de textures, couleurs et saveurs ;
- ✓ la stabilisation de la matière première par l'abaissement de la teneur en eau du matériau et l'inactivation des micro-organismes ;

Suivant l'application envisagée, le procédé de la friture pourra être intégré :

- ✓ dans les opérations de cuisson (terme générique utilisé ici pour les opérations de transformation des aliments par la chaleur) ;
- ✓ dans les opérations de stabilisation des aliments (pasteurisation, déshydratation, formulation) ;
- ✓ dans les opérations de séchage non conventionnel (**Graille Jean, 2003**).

## **Chapitre II**

### **La déshydratation osmotique partielle**

Il existe différents procédés de conservation des aliments faisant appel à un traitement par différence de concentration entre l'aliment et une solution concentrée. Il s'agit essentiellement du salage, du confisage, du semi-confisage et de la déshydratation osmotique. Le salage et le confisage sont des procédés traditionnels consistant à favoriser la pénétration de soluté dans le produit. La déshydratation osmotique, par contre, est un procédé cherchant à favoriser l'extraction de l'eau et à limiter la pénétration de soluté, ce qui conduit en général à des réductions de poids significatives (**Wack Raoult, 1994**).

#### **I. Définition**

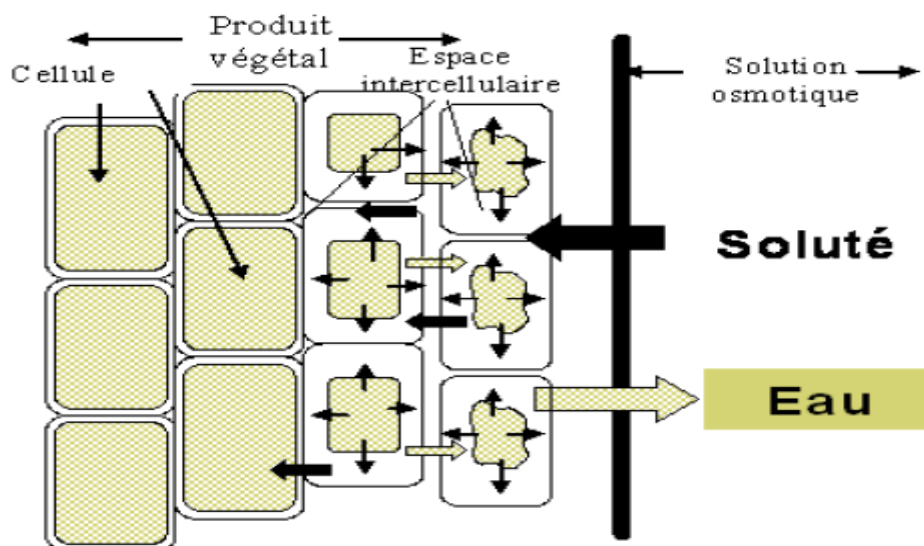
La déshydratation osmotique est attribuée au phénomène d'osmose, qui se manifeste à travers les membranes cellulaires des tissus « semi-perméables » (perméables à l'eau, mais moins aux solutés). Le moteur de ce transfert est une différence de concentration entre la solution et le matériau à traiter (**Wack Raoult, 1994**). Il se traduit par deux écoulements simultanés à contre-courant : une diffusion de l'eau des cellules du produit (la solution la moins concentrée) vers la solution hypertonique où l'aliment est plongé (déshydratation) et une entrée de soluté de la solution vers l'aliment (imprégnation). L'aliment peut ainsi perdre jusqu'à 50% de la teneur initiale en eau en moins de 3 heures (**Lerica et al., 1985**).

La sortie d'eau s'accompagne généralement d'une perte de solutés propres au produit alimentaire. Ce transfert, quantitativement négligeable par rapport aux deux premiers, soulève des critiques quant à son impact sur les qualités organoleptiques et nutritionnelles du produit transformé (**Albagnac et al., 2002**).

#### **II. Principe**

La déshydratation osmotique est un procédé basé sur la mise en contact de l'aliment (fruits, légumes, viandes) entier ou découpé en morceaux, avec des solutions fortement concentrées (**Baron V.,2010**). Elle se fait dans des conditions de température douces et pendant un temps suffisant pour obtenir un transfert de matière optimum. Ceci conduit à une déshydratation du produit, ainsi qu'à son imprégnation par les substances contenues dans la solution (**Shi, X.Q. et al., 1996 ; Anikó Matusek et al., 2003**).

La déshydratation osmotique doit être suivie d'un traitement complémentaire tel qu'un séchage pour obtenir une conservation de longue durée.



**Figure n°6:** Représentation schématique de flux de transfert de matière dans un système Végétal /liquide.

### III. Cinétique de la déshydratation osmotique

Les cinétiques de transfert de matière dans les produits végétaux peuvent se décomposer en deux phases : une première phase, responsable de l'essentiel des transferts d'eau et de solutés, suivie d'une seconde phase, pendant laquelle la perte en eau ralentit fortement tandis que les débits d'entrée en solutés continuent d'augmenter régulièrement (**Kowalska et al., 2008**). Il semble probable que les membranes cellulaires soient victimes d'une perte de leur caractère semi-perméable, permettant progressivement aux solutés de pénétrer dans la cellule (**Wack Raoult, 1994**). La durée de la première phase est très variable suivant le produit traité, d'une demi-heure à deux heures dans les conditions les plus courantes (morceaux de petites tailles, de l'ordre du  $\text{cm}^3$ ). Ces transferts se déroulent à travers les parois et membranes cellulaires du produit. À l'intérieur de ces derniers, les espaces intercellulaires servent de lieux d'accumulation ou de passage pour les substances échangées (**Wack Raoult, 1994 ; Kowalska et al., 2008**).

Deux approches sont employées afin d'étudier la cinétique de la déshydratation osmotique :

■ L'approche classique se base sur la détermination de deux paramètres. En effet, des travaux antérieurs ont prouvé que deux paramètres peuvent quantitativement représenter le processus osmotique. Ces paramètres sont la perte d'eau (« *Water loss* », **WL**), indiquant l'eau qui sort du matériel cellulaire vers la solution et le gain en solides (« *Solids Gain* », **SG**).

Ces paramètres sont habituellement déterminés par la mesure des solides totaux ou par analyse chimique (**Krokida et al., 2000 ; Segovia Garcia et al., 2010**).

■ L'approche fine qui se base sur l'étude des paramètres déterminés à partir de la calorimétrie différentielle à balayage et la résonance magnétique nucléaire (RMN).

#### **IV. Principaux facteurs influençant les performances de la DO**

Les cinétiques de transfert d'eau et de solutés dépendent de trois facteurs (**Rastogi et al., 2004 ; Segovia G. et al., 2010**) :

➤ Les propriétés intrinsèques des tissus traités : la structure poreuse, la taille, la forme, la superficie du produit ;

➤ Les conditions opératoires de traitement : temps, température de traitement, pression, agitation de la solution, composition de la solution ;

➤ Le mode de mise en contact des phases entre l'aliment solide et la solution liquide.

##### **IV.1. Facteurs liés à l'aliment**

###### **IV.1.1. Propriétés des tissus biologiques**

Tout ce qui est préjudiciable à l'intégrité des tissus, telle qu'une maturation trop avancée, la mise en œuvre de prétraitements thermiques, chimiques ou enzymatiques, peut entraver la perte en eau tout en favorisant le gain en soluté. La grande variabilité observée dans le comportement des végétaux au cours d'un traitement de DO est généralement attribuée aux différentes propriétés tissulaires. Ces dernières incluent la compacité des tissus, l'importance relative des espaces intra- et extra-cellulaires, la porosité et la teneur initiale en matières sèches (**Lenart, 1996**).

En effet, la porosité de l'aliment affecte sa texture et influence sa fermeté. Les changements de porosité causés par le processus osmotique favorisent l'action des forces d'entraînement non diffusionnelles tels que des gradients de pression (**Nieto et al., 2004**). La majorité des produits



végétaux sont découpés en cube ou en sphère avant le traitement de déshydratation osmotique, ce qui facilite le transfert de matière grâce à un contact direct entre les cellules et la solution (**Kowalska et al., 2008**).

Lors d'une DO, quelques cellules peuvent devenir non viables, tandis que les autres restent pratiquement inchangées. Les traitements osmotiques impliquent ainsi un stress cellulaire par suite de la réduction de l'eau disponible dans les cellules, ce qui modifie leur physiologie (**Rastogi et al., 2004**).

#### **IV.1.2. Le choix du soluté**

C'est le résultat d'un compromis entre les exigences technologiques et la qualité du produit final, c'est-à-dire ses caractéristiques physicochimiques (pH, structure, etc.), ses propriétés nutritionnelles et organoleptiques (texture, couleur, etc.), ses propriétés fonctionnelles spécifiques (pouvoir aromatique, sucrant, colorant, état de surface collant ou brillant – dans l'exemple du glucose) et son pouvoir dépresseur de l'activité en eau. Les solutions à base de sucres (saccharose) sont les plus couramment utilisées dans la DO des fruits (**Lenart, 1996**). Toutefois, il est essentiel de prendre en compte le coût de ces solutés, qui peut se révéler prohibitif (**Giraldo et al., 2003**).

#### **IV.1.3. Découpage de l'aliment**

La majorité des produits végétaux sont découpés en cube ou en sphère avant le traitement de déshydratation osmotique, ce qui facilite le transfert de matière grâce à un contact direct entre les cellules et la solution (**Kowalska et al., 2008**).

### **IV.2. Facteurs liés à la solution osmotique**

#### **IV.2.1. Concentration de la solution osmotique**

La différence de concentration en soluté entre le produit à traiter et la solution est le moteur du transfert de masse en DO. La perte en eau est plus importante lorsque cet écart est initialement élevé (**Wack Raoult, 1994**). En effet, **Vial et al. (1990)** ont montré que toute augmentation de la concentration en sucre se traduit principalement par une augmentation des vitesses de transfert d'eau, les transferts de soluté n'étant que peu affectés.

Pour la déshydratation des fruits, des solutions de sucre concentrées de 50 à 70 °Brix ont été employées (**Lerica et al., 1985 ; Corrêa et al., 2010**).

Néanmoins, il existe une concentration seuil (entre 50 et 65 °Brix) au-delà de laquelle l'imprégnation décroît ( **Lenart et al., 1996**).

#### **IV.2.2. Composition de la solution osmotique**

La composition des solutions (type, masse moléculaire du soluté) mises en œuvre en DO est un facteur clé du procédé ( **Corrêa et al., 2010**). Les solutions sont préparées à partir de solutés cristallins solubles ou de solvants miscibles à l'eau, utilisés seuls ou en mélange. Les constituants doivent être dépourvus de toute toxicité, présenter une solubilité suffisante et être, idéalement, bon marché ( **Rastogi et al., 2004**). Utiliser différents solutés en mélange permet de tirer parti de l'effet respectif de chacun (masse molaire, propriétés de diffusion, etc.), mais aussi de développer des interactions spécifiques (soluté-soluté et soluté-aliment) pour mieux maîtriser les niveaux de déshydratation et d'imprégnation ( **Giraldo et al., 2003**).

L'addition de NaCl à une solution osmotique semble augmenter la force d'entraînement lors de la déshydratation. Ce phénomène est attribué à la capacité du NaCl d'abaisser l'activité de l'eau ( $a_w$ ) ( **Kowalska et al., 2008**). **LeMaguer et al. (1997)** ont montré que l'utilisation d'une solution osmotique contenant 44 % de saccharose et 7 % de NaCl permet d'optimiser les conditions de déshydratation osmotique des carottes.

#### **IV.2.3. Température de la solution osmotique**

Le rôle de la température dans la DO a été étudié sur un large éventail de températures (5-85 °C), le domaine de travail devrait être adapté pour chaque famille de produit ( **Lerica et al., 1985 ; Flourey et al., 2008**). Une température opératoire comprise entre 20 et 40 °C est souvent considérée comme optimale sur le plan qualitatif ( **Lerica et al., 1985**).

A ces températures, la semi-perméabilité des membranes cellulaires de différents végétaux est à peine affectée. L'extraction de l'eau est alors possible seulement par des processus osmotiques. Les transferts d'eau sont favorisés par des températures élevées ( **Flourey et al., 2008**). Aussi, le sucrage et le confisage des fruits sont habituellement réalisés à 60 °C. Cependant, une température trop élevée n'est pas souhaitable car la température est l'un des facteurs responsables de la rupture des tissus végétaux et des membranes ( **Thebud et al., 1982**).

Pour chaque fruit ou légume il existe une température seuil, au-delà de laquelle la qualité du produit est affectée et les transferts de soluté prennent le pas sur le transfert de l'eau (**Floury et al., 2008**).

### **IV.3. Durée du traitement**

La durée du traitement est un facteur important à considérer, quels que soient les produits traités. Généralement, la perte d'eau, la réduction de masse et le gain en solides augmentent avec le temps de traitement (**Rastogi et al., 2004 ; Kowalska et al., 2008**).

**Marchal et al. (2005)** ont rapporté un changement de sélectivité au cours de la déshydratation, c'est-à-dire que le rapport de la perte en eau sur le gain en solide (PE/GS) décroît au cours du temps. Ce phénomène déjà mentionné est attribué à la mort des cellules qui accompagne l'augmentation de la concentration en sucre dans le tissu (**Mavroudis et al., 2004**). Ceci conduit à la perte de fonctionnalité de la membrane cellulaire et peut affecter la qualité du produit. **Lenart (1996)** a montré que la durée de déshydratation de morceaux de pomme ne doit pas dépasser une durée de 15 min à une température comprise entre 70 et 90 °C.

### **IV.4. Effet de l'agitation sur la DO**

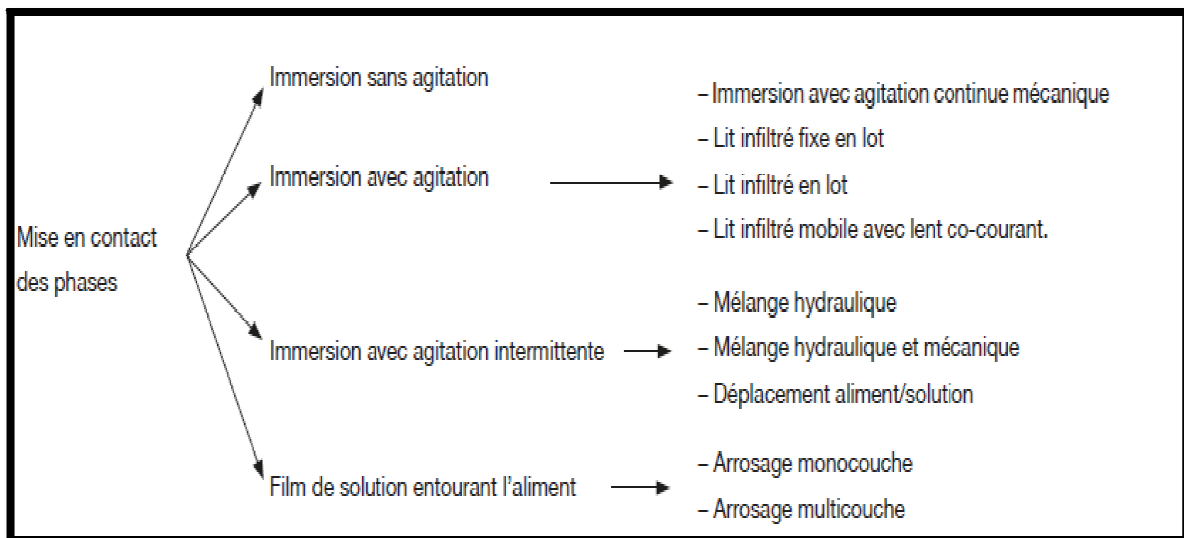
Dans le cas de tranches de fruits, les coefficients de transfert d'eau libre et de saccharose de la solution de déshydratation augmentent, non seulement avec la concentration en saccharose, mais aussi avec l'agitation (**Vial et al., 1990 ; Marouzé et al., 2001**) ont montré que le transfert de masse nécessite une agitation entre la solution et le produit qui, pouvant être discontinue, permet un gain d'énergie. En effet, **Mavroudis et al. (2004)** ont mesuré les effets de l'agitation sur le transfert de masse en termes de nombre de Reynolds et ont montré qu'une forte agitation augmente la perte en eau. Au cours du temps, la perte en eau s'avère moindre lorsque la DO est réalisée en écoulement laminaire plutôt que turbulent. Le gain en solide n'est que peu affectée par le niveau d'agitation, ce qui s'explique par l'existence d'une couche limite diluée autour de l'aliment (**Giroux et al., 1994**).

### **IV.5. Effet du rapport solide/solution**

Des études ont montré qu'un rapport pondéral, solution de déshydratation/tranches de fruit, trop grand (facteur de dilution trop marqué), rend difficile la détermination des différentes substances diffusées et le suivi efficace du phénomène osmotique. Par contre, un rapport petit ralentit le taux de diffusion (**Adamrounou et al., 1994**).

#### **IV.6. Mode de mise en contact des phases**

Les transferts de matière dépendent fortement de la manière dont sont mises en contact les phases solide (fragile et « légère » ; l'aliment) et liquide (« lourde » et visqueuse, la solution hypertonique). Une viscosité élevée du liquide augmente la résistance externe (à l'interface solide/liquide) aux transferts de matière et nécessite la mise en œuvre d'un système de brassage adapté, compatible avec la fragilité des produits. Pour une meilleure efficacité de la DO, les systèmes de mise en contact des phases doivent permettre de réduire la dispersion des temps de séjour, forcer l'immersion des produits, réduire les effets de couches limites et préserver la forme et la fragilité des produits (Adamrounou et al., 1994).



**Figure n°7** : Les différents systèmes de mise en contact des phases (solution osmotique et l'aliment) pour une déshydratation osmotique (Marouzé et al., 2001).

#### **IV.7. Mise en œuvre de la déshydratation osmotique**

Chaque fruit ou légume présentant ses propres conditions optimales de déshydratation osmotique, il est difficile de mettre en avant une méthodologie universelle. Typiquement, tant pour les fruits que pour les légumes, le régime turbulent est préféré, avec des temps de séjour compris entre 5 et 480 min. L'optimum de température se trouve habituellement entre 25 °C et 80 °C, et le rapport produit/solution évolue généralement entre 1/2 et 1/20.

Le soluté le plus fréquemment rencontré est le saccharose, employé à des concentrations comprises entre 38 °Brix et 65 °Brix pour les fruits, et entre 35 °Brix et 60 °Brix pour les légumes. L'usage du sel comme soluté est souvent réservé à la déshydratation des légumes. Il apparaît ainsi nécessaire, industriellement, d'optimiser les conditions de traitement spécifiquement pour chaque produit (**Bchir et al., 2011**).

## **V. Application de la déshydratation osmotique**

La DO est un procédé relativement lent. Il est donc important de trouver des méthodes qui augmentent le transfert de masse sans affecter la qualité du produit. Ainsi, un traitement permettant d'augmenter la perméabilité des membranes cellulaires et de faciliter la libération de l'eau pendant la DO est obligatoire. Parmi les prétraitements utilisés, on peut citer les méthodes thermiques de blanchiment et de congélation. D'autres procédés consistent à remplacer un traitement unique (ici, la DO) par la combinaison de plusieurs techniques de conservation modérées, respectueuses du produit et pouvant accélérer les transferts. Ces techniques peuvent être l'application du vide, les hautes pressions hydrostatiques, l'ultrasons, les irradiation, la centrifugation, le champs électrique pulsé, etc. (**Bchir.B., 2011**).

### **V.1. Pré-traitement thermique**

#### **V.1.1. Le blanchiment**

Le blanchiment est un traitement thermique, réalisé par immersion du produit dans un bain d'eau chaude, par passage dans une atmosphère de vapeur ou par chauffage ohmique. Sa durée est de quelques minutes, dans une gamme de 85 °C à 100 °C. Il permet de détruire les enzymes susceptibles d'altérer les légumes ou les fruits avant son traitement ultérieur (dans notre cas, c'est la déshydratation). Ce procédé prévient ainsi un certain nombre d'altérations organoleptiques telles que des modifications de saveurs et de couleurs (dégradation de la chlorophylle, brunissement des pommes, etc.). Il limite également certaines pertes nutritionnelles comme la destruction des vitamines et permet l'élimination de l'air et des gaz occlus dans les tissus végétaux facilitant la réhydratation (**Dermesonlouoglou et al., 2008**). En accompagnant la DO, le blanchiment facilite le transfert des matières dissoutes, comme il l'a été rapporté pour les tranches de pomme et de tomate précédemment blanchies à la vapeur (**Dermesonlouoglou et al., 2008 ; Kowalska et al., 2008**).

En revanche, si le blanchiment est opéré à des températures trop élevées pour les constituants cellulaires, ce qui va induire un risque accru de l'altération qualitative et de pertes par dissolution.

### **V.1.2. La congélation**

L'eau est le principal composant de la majorité des aliments congelés du commerce. Une part notable de cette eau est liée à divers degrés : dans des complexes colloïdaux macromoléculaires, dans des structures gélifiées ou fibreuses à l'intérieur des cellules et dans les hydrates. Lors de la congélation, la nucléation de la glace et la croissance des cristaux apportent de nombreuses modifications au produit (**Talens et al., 2003**). Les composantes cellulaires solubles peuvent atteindre la saturation et précipiter, détruisant ainsi la turgescence des tissus ; des modifications de pH peuvent affecter les complexes colloïdaux ; des changements très marqués de pression osmotique peuvent rompre les membranes semi-perméables, ce qui facilite le transfert de masse au cours de la déshydratation osmotique (**Dermesonlouoglou et al.; Flourey et al.; Kowalska et al., 2008**).

La vitesse de congélation et la température finale de conservation sont des points critiques pour le maintien des propriétés sensorielles, fonctionnelles ou biologiques après la congélation. Une congélation très lente peut conduire à un exsudat excessif à la décongélation, alors qu'une congélation très rapide permet de préserver la texture de certains produits (**Talens et al., 2003**).

## **V.2. Méthodes combinées à la DO**

### **V.2.1. Imprégnation sous vide**

Le procédé de DO pour les produits végétaux est généralement mis en œuvre à pression atmosphérique (**Wack Raoult, 1994**). Toutefois, l'application d'une dépression stationnaire augmente la vitesse de déshydratation (**Corrêa et al., 2010**). La présence de gaz occlus dans les espaces intercellulaires de la structure poreuse du produit traité apparaît comme la cause principale de la modification des cinétiques de transferts de matières (**Fito, 1994 ; Wu et al., 2009**).

Pendant la DO sous vide, le gaz est expulsé du tissu tandis que l'écoulement capillaire augmente. L'augmentation de la vitesse du transfert d'eau est principalement attribuée à l'action combinée du vide et de l'écoulement capillaire, qui dépend lui-même du volume de gaz occlus dans le tissu. Par conséquent, l'accélération des transferts de matière en DO sous vide est d'autant

plus marquée que la porosité du produit est plus importante (**Corrêa et al., 2010**). Cependant, sous vide pulsé, c'est l'imprégnation qui est favorisée. En effet, lorsque le produit revient à pression atmosphérique, la solution concentrée pénètre massivement dans les pores du produit alimentaire, ce qui a pour conséquence ultérieure d'augmenter la surface de contact entre le produit et la solution et d'accélérer ainsi les transferts de matières (**Fito, 1994**). **Corrêa et al. (2010)** ont obtenu par cette technique une perte d'eau plus élevée que dans le cas d'une DO ordinaire, en utilisant le vide seulement pendant 15 min.

La technologie du sous vide partiel cyclique trouve tout son potentiel lorsque l'on souhaite formuler le produit à l'aide d'additifs. Ainsi, la texture des fruits peut être améliorée par immersion sous vide dans une solution contenant de la pectine-méthylestérase ou différentes solutions salines, par exemple à base de chlorure de calcium ou de nitrate de calcium (**Javeri et al., 1991**). La DO sous vide permettrait d'obtenir des produits de qualité organoleptique et physicochimique supérieure à celle des produits traités par DO à pression atmosphérique. De plus, cette alternative réduit les coûts énergétiques globaux (**Fito, 1994**).

### **V.2.2. Haute pression hydrostatique**

Les traitements à haute pression permettent une stabilisation microbiologique significative des aliments, tout en préservant les qualités organoleptiques et nutritionnelles de manière plus importante que les traitements thermiques. Certaines études (**Taiwo et al., 2002 ; Rastogi et al., 2004**) ont mis en évidence le fait que le prétraitement à haute pression crée un compactage de la structure cellulaire accompagné d'une libération de composants cellulaires. Ce phénomène a pour conséquence la formation d'un gel par liaison d'ions divalents avec la pectine estérifiée qui limite le coefficient de diffusion des solides. À haute pression, les membranes cellulaires sont réversiblement perméabilisées. Ce phénomène est imputable aux transitions de phase des bicouches lipidiques de la membrane cellulaire. Cet effet est recherché pour l'élaboration rapide des fruits sucrés tout en préservant l'aspect, les qualités organoleptiques et nutritionnelles du produit frais. Cependant, la technologie haute pression reste coûteuse, du fait des contraintes de fabrication des enceintes et par leur capacité limitée.

### **V.2.3. Ultrasons**

L'application d'ultrasons (onde à fréquence supérieur à 20 000 Hz) a déjà fait ses preuves dans l'augmentation du taux de transfert de masse pour la déshydratation osmotique de tissus poreux comme des cubes de pomme. **Simal et al. (2001)** ont obtenu par cette technique une perte

d'eau de 27 % et un gain de solide de 23 % plus élevés que dans le cas d'une DO ordinaire. L'application d'ultrasons produit un phénomène de cavitation consistant en la formation dans le liquide de bulles de gaz qui engendrent, en éclatant, des fluctuations de pression (**Fernandes et al., 2009**). Cet effet facilite la diffusion pendant le processus osmotique et accélère le dégazage du produit, tout en préservant la saveur, la couleur et les composants nutritifs les plus sensibles à la chaleur (**Simal et al., 2001**). Cette technique permet aussi l'inactivation des enzymes et des bactéries en cassant leurs membranes cellulaires (**Jambrak et al., 2010**).

#### **V.2.4. Irradiation**

La structure intérieure du tissu des produits agricoles peut être lysée par  $\gamma$ -irradiation. Il en résulte une plus grande perméabilité des cellules, d'où un transfert de masse amélioré pendant un séchage à l'air (**Wang et al., 2000**). **Rastogi et al. (2004)** ont rapporté que la combinaison de la  $\gamma$ -irradiation avec la DO peut résoudre le problème de la diminution des transferts de masse pendant un séchage convectif.

#### **V.2.5. Chlorure de sodium**

Comme il a été déjà mentionné, le type d'agent osmotique utilisé et par conséquent, sa masse moléculaire, affecte fortement la cinétique d'extraction d'eau et de gain en soluté. D'après **Simal et al. (2001)**, le chlorure de sodium est un excellent agent osmotique, en raison de sa faible masse moléculaire qui se reflète par sa grande mobilité pendant le transfert de masse.

Dans le cas des solutions sucrées-salées, des effets fortement antagonistes sur le gain en solutés ont été identifiés. L'imprégnation en sel est en particulier limitée par la présence de sucre. Cet effet « barrière » du sucre sur la pénétration du sel a été mis en évidence sur des produits végétaux (**Lenart, 1996**). Il serait dû à la formation, dans l'aliment, d'une couche périphérique fortement concentrée en sucre. En même temps, la présence de sucre diminuerait fortement le coefficient de diffusion du NaCl (**Lenart, 1996**). La présence de sel empêche par ailleurs dans certains cas la formation d'une croûte superficielle (croustade du produit) causée par le sucre.

#### **V.2.6. Centrifugation**

Cette technique peut être utilisée pour augmenter la perte en eau tout en retardant le gain en solide. **Azuara et al. (1998)** ont appliqué une force centrifuge de 64  $g$  pendant la déshydratation osmotique, de disques de pomme et de pomme de terre entière à 30°C. Ils ont observé que ces



conditions augmentent le transfert de masse (perte en eau) de 15 % tout en retardant considérablement (80 %) le gain en solide.

### **V.2.7. Traitement par champ électrique pulsé**

Le traitement par champ électrique pulsé, pour une intensité de champ électrique comprise entre 0,5 et 15 kV·cm<sup>-1</sup>, entraîne une augmentation de la perméabilité des membranes végétales. Son action instantanée, sa courte durée d'application (moins d'une seconde) et la possibilité de traiter des aliments solides à basse température, rendent le champ électrique pulsé plus prometteur qu'un traitement thermique dans une perspective de diffusion ou d'extraction d'eau (séchage) ou de métabolites (**Ade-Omowaye et al., 2003**). Un autre avantage du champ électrique pulsé réside dans le fait qu'il n'augmente pratiquement pas la température du produit. **Ade-Omowaye et al. (2003)** ont montré que la cinétique de DO à 20 °C du paprika traité à 2,5 kV·cm<sup>-1</sup> est comparable à celle d'une DO réalisée à 55 °C sur le même produit sans application de champ électrique.

### **V.2.8. Stabilisation des produits déshydratés osmotiquement par des traitements physiques**

Les produits issus du procédé de déshydratation osmotique sont classés parmi les produits à humidité intermédiaire (PAI), (**Garcia-Martinez et al., 2002**). Aussi, le produit n'est pas encore microbiologiquement stabilisé et l'activité de l'eau peut y être élevée. Plusieurs traitements ont été proposés pour parfaire le processus : séchage, congélation, pasteurisation, friture, etc. Les plus communs sont le séchage par air (**Ade-Omowaye et al., 2003**) et la congélation (**Agnelli et al., 2005**).

#### **V.2.8.1. Séchage**

Le séchage provoque un abaissement de l'activité de l'eau du produit, c'est-à-dire que l'eau reste peu disponible pour les micro-organismes et pour les réactions chimiques. On considère généralement qu'un produit est stable lorsque son activité de l'eau est inférieure ou égale à 0,65 (**Thebud et al., 1982**). L'utilisation du séchage dans les industries agro-alimentaires a de multiples objectifs : accroître la durée de conservation des produits, stabiliser les produits agricoles (maïs, luzerne, riz, lait, etc.) pour amortir le caractère saisonnier de certaines activités et transformer les produits par des réactions biochimiques ou biologiques (produits de salaison,

touraillage de malt, etc.). Cependant, cette technique est couteuse en énergie : le séchage des produits végétaux nécessite environ  $5\,000\text{ kJ kg}^{-1}$  d'eau évaporée (**Mujumdar, 2006**).

La combinaison de la déshydratation osmotique avec le séchage permet d'améliorer la qualité des produits et de réduire le cout énergétique global de l'élimination de l'eau. En effet, la pré-déshydratation diminue le temps de séchage et le besoin énergétique du séchage complémentaire (**Fernandes et al., 2006**). En effet, la DO n'exige qu'entre 100 et  $2\,400\text{ kJ kg}^{-1}$  d'eau enlevée, selon les applications (**Mujumdar, 2006**).

Après une période de mise en régime, la cinétique de séchage par l'air est caractérisée par une période à une vitesse de l'eau constante, correspondant à l'évaporation de l'eau de surface qui est constamment renouvelée par transport interne et qui se traduit par une variation linéaire de la teneur en eau en fonction du temps. Cette première période est suivie d'une ou plusieurs étapes à des vitesses décroissantes, où les forces capillaires n'acheminent plus suffisamment d'eau en surface pour compenser l'évaporation (**Ade-Omowaye et al., 2003**).

Pour les produits alimentaires et biologiques, le séchage est limité par la résistance des parois cellulaires, par la migration des solutés qui obstruent les pores et par le croutage de la surface (**Wang et al., 2000 ; Ade-Omowaye et al., 2003**).

### **V.2.8.2. Congélation**

La congélation des aliments est un excellent moyen de maintenir pendant longtemps, presque inchangées, leurs valeurs nutritionnelles. Cette préservation de la qualité s'explique tant par l'abaissement de la température qui ralentit les réactions biochimiques et inhibe les activités microbiennes que par la réduction de l'activité de l'eau du substrat (**Floury et al., 2008**). La possibilité de prétraiter les produits par une déshydratation partielle avant congélation semble prometteuse (**Talens et al., 2003 ; Wu et al., 2009**). Cette technique, dite de déshydro-congélation, permet la réduction de la quantité d'eau dans le produit afin de diminuer la quantité de cristaux formés, le temps de congélation et de décongélation. Il en résulte une meilleure conservation des propriétés du fruit. La déshydratation osmotique constitue de ce point de vue un prétraitement efficace (**Talens et al., 2003 ; Dermesonlouoglou et al., 2008**).

Au point de vue énergétique, on notera que, sans déshydratation préalable, la congélation des fruits nécessite entre  $250$  et  $340\text{ kJ kg}^{-1}$  d'eau congelée et entre  $150$  et  $320\text{ kJ kg}^{-1}$  d'eau congelée pour les légumes (**Mujumdar, 2006**).

## **VI. Équipements pour la DO**

Diverses configurations de mise en contact des phases ont été proposées et étudiées .En pratique, l'opération peut être réalisée en contacteur continu ou discontinu, avec ou sans agitation. Les contacteurs discontinus (batch) sont les plus utilisés. Certains auteurs proposent simplement une immersion forcée des morceaux dans le liquide (**Marouzé et al., 2001**). Cette solution est d'ailleurs utilisée dans la plupart des entreprises de semi-confisage de fruits. D'autres systèmes plus élaborés ont été proposés en vue d'une mise en œuvre du procédé en continu : fluidisation inverse (**Wack Raoult, 1994**), brassage mécanique ou brassage mixte hydraulique/mécanique (**Giroux et al., 1994**).

## **VII. Qualité des produits végétaux traités par DO**

La déshydratation osmotique permet le maintien des qualités nutritionnelles, voire l'amélioration des qualités organoleptiques de produits souvent fragiles, ainsi qu'une meilleure résistance à des traitements ultérieurs (séchage, stockage, etc.). En effet, en tenant compte de la possibilité de transferts de masse dans les deux sens (gain de solutés et perte de solutés), la déshydratation osmotique permet la formulation de nouveaux produits (**Albagnac et al., 2002**). Selon **Wack Raoult (1994)**, la déshydratation osmotique permet de modifier les propriétés fonctionnelles des produits en les imprégnant des solutés souhaités. La DO augmente le rapport sucre/acide, améliore la texture et préserve la couleur pendant la déshydratation et le stockage. Toutefois, il convient de noter que les apports en soluté, notamment en sucres, ne vont toujours pas dans le sens d'une amélioration des propriétés nutritionnelles.

En évitant le contact avec l'oxygène de l'air, la DO limite les réactions d'oxydation, mais aussi les pertes de composés volatils par entraînement. Elle est efficace même à température modérée (souvent inférieure à 50 °C), ménageant ainsi les composés thermosensibles tels que les arômes, pigments et vitamines (**Vial et al., 1990**).

L'effet de la DO sur les différents attributs de la qualité est détaillé ci-après.

### **VII.1. Saveur**

Au cours de la DO, l'introduction de soluté modifie inévitablement le rapport acides/sucre, ce qui adoucit la saveur du produit final. Cependant, en séchage ou en DO, l'élimination d'eau ne doit pas se faire au détriment de la saveur .En règle générale, tout facteur tendant à augmenter la

viscosité de la solution osmotique diminue la diffusivité relative des arômes. Ainsi, il vaut mieux en DO diminuer la température et augmenter la concentration du produit en matières sèches pour conserver les arômes (**Torreggiani et al., 2001**).

## **VII.2.Couleur**

La couleur est un attribut très important des aliments, car elle influence l'acceptabilité par le consommateur (40 % du critère d'acceptabilité) (**Falade et al., 2007**). Des couleurs anormales, suggérant la détérioration de la qualité ou du caractère comestible, sont des causes de rejet par le consommateur. Beaucoup de réactions peuvent affecter la couleur pendant le traitement thermique des fruits et de leurs dérivés. Les plus connues sont la dégradation des pigments (chlorophylle,  $\beta$ -carotène, etc.), les caroténoïdes et la chlorophylle, les réactions de brunissement telles que la réaction de Maillard des hexoses, et l'oxydation de l'acide ascorbique. Au cours de la DO, les solutés introduits réduisent les modifications de la couleur du produit. L'activité enzymatique de polyphenol-oxydase responsable du brunissement enzymatique est alors inhibée. La sensibilité des produits au brunissement non enzymatique est également limitée (**Torreggiani et al., 2001**).

## **VII.3.Texture**

Le départ d'eau, ainsi que son remplacement par d'autres molécules, implique des contraintes mécaniques qui modifient la conformité du matériau. Ainsi, le produit se rétracte sous l'action des fortes densités de flux (**Castello et al., 2009 ; Garcia-Segovia et al., 2010**). D'autre part, au cours du processus de déshydratation, les polysaccharides (pectine, hémicelluloses, cellulose) qui constituent la membrane cellulaire sont partiellement solubilisés, modifiant ainsi la fermeté du produit (**Nunes et al., 2008**). Ces modifications sont quantifiables par l'analyse de la texture du produit ; ces mesures sont basées sur la résistance à la pénétration par une sonde (**Torreggiani et al., 2001**).

## **VII.4.Réhydratation**

Les produits déshydratés sont souvent conçus pour être réhydratés ultérieurement. La capacité et la vitesse de réhydratation qui est souvent longue (plusieurs heures), sont décrites comme les principaux critères de la qualité des produits finis. La réhydratation des fruits et légumes a été bien étudiée (**Taiwo et al., 2002 ; Rastogi et al., 2004**). Une étude de la cinétique de réhydratation peut être effectuée pour mesurer l'ampleur nette des dommages subis par le

produit pendant les étapes de transformation antérieures (**Rastogi et al., 2004**). La réhydratation est influencée par plusieurs facteurs, groupés en tant que facteurs intrinsèques (composition chimique du produit, traitement de pré-séchage, formulation de produit, techniques et conditions de séchage) et extrinsèques (composition du milieu d'immersion, température, conditions hydrodynamiques).

Certains de ces facteurs induisent des changements de structure et de composition du tissu végétal, ce qui influence les propriétés de reconstitution lors de la réhydratation (**Taiwo et al., 2002**). Par exemple, plus la concentration en sucres est grande ou plus la période de la DO est longue avant séchage, meilleure est la réhydratation, le sucre empêchant probablement le rétrécissement du tissu végétal lors du séchage à l'air. Dans l'étude sur le céleri sec, **Neumann (1972)** a rapporté que la réhydratation à des températures élevées diminue le temps exigé pour atteindre la capacité maximum de sorption d'eau et le contenu d'humidité finale.

#### **VII.5. Effet de la déshydratation osmotique sur la composition biochimique**

De tous traitements technologiques, la déshydratation partielle par osmose est probablement le procédé le plus complexe du point de vue transfert de masse entre l'intérieur et l'extérieur des morceaux de fruits traités (**Adambounou et al., 1994**). En effet, durant le phénomène osmotique, les morceaux des fruits submergés dans la solution osmotique sont le siège de divers échanges. L'eau libre contenue dans les fruits vers la solution de déshydratation entraînant avec elle certaines substances hydrosolubles et acides organique (**Ponting, 1973**). Dans le sens opposé, les substances en concentration élevée, la solution migre vers l'intérieur du fruit. Ces échanges de part et d'autre de la membrane semi-perméable des cellules des fruits continuent jusqu'à ce que l'équilibre osmotique soit atteint dans le système.

#### **VIII. Valorisation des fruits conservés en solution sucrée**

Les fruits ont été depuis longtemps conservés par le sucre. La fabrication de produits déshydratés osmotiquement remonte à la haute antiquité. Aujourd'hui, la conservation des fruits par les sucres est devenue une industrie à part entière, et est appliqué à une vaste gamme de produits, comme les fruits confits (**Espiard, 2002**), les compotes et purées, la confiture, les pâtes de fruits (**Espiard, 2002 ; Albagnac et al., 2002**). On trouve sur le marché un nombre de produits apparentés ayant tous subis des transformations visant non seulement à obtenir des fruits stables à température ambiante (grâce à une réduction de leur activité d'eau), mais à leur conférer également une texture et une saveur spécifique.

## **IX. Influence du traitement par osmose sur le comportement à la désorption**

L'imprégnation du produit par le soluté de la solution osmotique va modifier son comportement ultérieur en désorption. Le comportement pendant le séchage est fortement affecté par la présence du soluté de faible masse molaire. En effet, le comportement des fruits à forte teneur en sucres est influencé par le comportement propre des sucres endogènes et /ou rapportés et par leur interaction avec les bio polymères, en fonction des conditions de prétraitement et des conditions de sorption (Themlin et al., 1995).

## **X. Différentes méthodes de la déshydratation osmotique**

### **X.1. La méthode discontinue de la déshydratation osmotique**

Dans cette méthode et dans le but de suivre la cinétique de transfert de masse, on utilise des échantillons de taille et de géométrie identique, en supposant que tous les échantillons ont exactement le même volume, la même taille et la même teneur en eau, en prenant la précaution d'avoir le même degré de maturité du produit, on effectue un dosage d'humidité pour chaque échantillon.

### **X.2. La méthode continue de la déshydratation osmotique**

Comme il est difficile d'obtenir le même degré de maturité du produit, le même échantillon est utilisé durant tout le processus de la déshydratation osmotique, pour lequel on effectue un dosage d'humidité au début et à la fin du traitement osmotique. La dispersion des résultats dans le cas de la méthode discontinue serait due au fait que même si les échantillons ont la même taille et la même géométrie, il pourrait y avoir une différence dans leur poids et dans leur extrait sec (soluble) initial (Azuara et al., 1988). Cette dispersion n'est pas notée dans la méthode continue, elle présente de plus un avantage en temps, en réactif et en économie du travail. Il est important de noter que dans les deux méthodes la perte en eau et le gain en solutés croissent linéairement.

## **XI. Intérêt de la déshydratation osmotique**

La déshydratation osmotique présente un double intérêt, une économie d'énergie et une amélioration de la qualité du produit (Lewincki et al., 1982 ; Dixon et al., 1977). En effet, le soluté incorporé peut être un soluté à finalité nutritionnelle (ex : substance de charge à faible

pouvoir énergétique, nutriment spécifique, vitamine, minéraux), un agent de conservation (ex : antimicrobien, antioxydant) et / ou un agent de texture.

L'un des avantages majeurs de la déshydratation osmotique est la rétention des saveurs fraîches des fruits. La déshydratation osmotique fournit en plus de la déshydratation conventionnelle, la rétention de la saveur et de l'arôme (**Ponting, 1973**). Le deuxième intérêt lié à l'application de la technique à l'échelle industrielle est l'économie d'énergie, du fait qu'on opère en phase liquide. Les coefficients d'échange de chaleur et de matière sont généralement bons. De plus, l'eau est enlevée du produit sans changement de phase (**Lazarides et al., 1995**). Ainsi, la déshydratation osmotique peut s'avérer plus rapide qu'un séchage classique à l'air chaud ou une lyophilisation (**Lewincki et al., 1980**). Cette technique est très prometteuse dans la mesure où elle permet de formuler un aliment sans affecter son intégrité.

## **XII. Aspect économique de la déshydratation osmotique**

**Guilbert et Raoul-Wack (1990)** rapportent qu'il est nécessaire de confirmer l'intérêt économique du procédé par des études comparatives des procédés classiques de stabilisation et de procédés comportant une étape de déshydratation osmotique. Le coût de sirop de déshydratation pourra constituer le facteur limitant principal dans une évaluation technico-économique du procédé. La gestion des volumes de sirop apparaît comme une condition de la variabilité économique de ce procédé. Par contre, une opération de recyclage de sirop de déshydratation par concentration, qui correspond à la deuxième étape du procédé, n'est pas limitée dans la mesure où elle peut bénéficier des techniques optimisées d'évaporation. Enfin, la gestion des volumes des sirops apparaît comme une condition de la viabilité économique de ces produits.

## **XIII. La modélisation du processus de la déshydratation osmotique**

### **XIII.1. La méthode des plans d'expériences (MPE)**

La méthode des plans d'expériences est un ensemble de techniques complémentaires aidant sont utilisateur dans la détermination des expériences à réaliser ainsi que dans la compréhension et l'exploitation des résultats obtenus.

La MPE cherche à déterminer et à établir les liens existant entre deux types de variables :

- **La réponse** : grandeur physique étudiée ;

- **Les facteurs** : grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur, sensées influencer sur les variations de la réponse.

Elle vise aussi bien à comprendre les relations liant la réponse avec les facteurs, que les facteurs entre eux. Pour cela il faut établir un *modèle*, exprimant la réponse en fonction des facteurs, par la réalisation d'une série d'expériences qui sont toutes :

- déterminées à priori ;
- obligatoirement réalisables ;
- indépendantes entre elles.

La méthodologie des surfaces de réponse est considérée comme l'une des principales utilisations possibles de la MPE (**Vivier Stéphane, 2002**).

### **XIII.1.1. Méthodologie des surfaces de réponse (MSR)**

La méthodologie des surfaces de réponse constitue un volet de la MPE, c'est une technique qui vise à déterminer d'une façon quantitative les variations de la fonction réponse vis- à -vis des facteurs d'influence significative (**Goupy J., 1999 ; Box G., 1987**). Elle a été utilisée par **Saurel et al., (1994)** pour estimer les effets de la concentration du soluté, la température, le poids moléculaire du soluté et le temps de traitement sur le transfert de masse lors de la déshydratation osmotique des pommes. La MSR est un outil important dans l'analyse du processus de déshydratation osmotique et l'amélioration des produits. C'est une optimisation des techniques qui permet à l'expérimentateur de déterminer la relation entre la réponse décrivant les caractéristiques de qualité devant être optimisés. Certaines de ces variables doivent être maximisées et d'autres doivent être réduites au minimum (**Araujo et al., 2002**).



## Chapitre III

# Les isothermes de sorption

L'eau est l'une des composantes biochimiques les plus importantes des produits naturels et biologiques. La connaissance de l'eau adsorbée est d'un intérêt considérable en technologie alimentaire. En effet, l'activité thermodynamique de l'eau conditionne la vitesse et l'intensité des réactions chimiques (oxydation, réaction de Maillard), des réactions enzymatiques, le développement et la physiologie des micro-organismes et modifie la plupart des propriétés physiques (propriétés rhéologiques, mécaniques) (**Multon, 1982**).

### **I. L'état de l'eau dans les aliments**

L'eau de formule chimique  $H_2O$ , est le constituant majeur de la plupart des aliments. Bien qu'elle n'apporte aucune valeur énergétique aux aliments, sa présence joue un rôle très important. Elle influence la structure, l'apparence, le goût des aliments et leur susceptibilité à la dégradation (**Alais Charles, Linden Guy, Miclo Laurent, 2008**).

Deux propriétés remarquables de la molécule d'eau ; la symétrie tétraédrique et l'hétérogénéité de répartition des charges électriques permettent la formation des liaisons hydrogène, ainsi que les interactions entre l'eau et les substrats organiques et biologiques. En particulier les constituants des aliments retiennent et fixent les molécules d'eau essentiellement par ce type de liaisons (liaison directe avec les fonctions polaires des macromolécules : hydroxyles, carboxyles, aldéhyde, amine,... ; interactions ioniques en solution), ainsi que par des interactions dues aux forces de **Van der Waals** (interactions hydrophobes, par exemple).

D'une façon générale, le degré de mobilité des molécules d'eau fixées sur un substrat augmente progressivement en fonction de la distance qui les sépare des sites hydrophiles. Les molécules de la première « couche » sont fortement fixées par plusieurs liaisons hydrogène de forte énergie. Alors que les énergies d'interaction et la durée de vie des liaisons

diminuent rapidement dans les couches suivantes. Si les méthodes spectroscopiques et les méthodes d'étude des isothermes de sorption permettent entre autre de mettre en évidence et d'évaluer les propriétés moléculaires, les interactions eau-substrat sont généralement mesurées dans les systèmes en équilibre, à pression et température constantes, à l'aide des paramètres qui vont être définis (**Girard, 1988**).

## **II. Paramètres de mesure de l'état de l'eau dans les substances biologiques**

La relation entre la durée de conservation d'un produit alimentaire et son degré d'hydratation est une donnée connue. On s'est longtemps contenté de la teneur en eau des produits comme critère permettant de faire des prévisions de conservation, ce critère est toujours utilisé sachant que les résultats pour un produits ne peuvent pas être généralisés pour les autres (une poudre de lait à 12% de teneur en eau s'altère très rapidement tandis qu'un blé stocké à 14% se conserve parfaitement).

Les travaux de **Mossel et Westerdijk (1949)**, sur le comportement des microorganismes en fonction de l'humidité relative en équilibre avec le produit alimentaire, puis l'introduction par **Scott (1953)** du concept d'activité de l'eau en microbiologie, ont permis de progresser considérablement dans ce domaine en faisant apparaître la notion de disponibilité de l'eau. Une première fraction de l'eau contenue dans un aliment se trouve très fortement liée et ne peut être utilisée par les microorganismes.

Au fur et à mesure que la teneur en eau augmente, les nouvelles fractions d'eau sont de moins en moins retenues (énergies de liaisons plus faibles) de telle sorte qu'il apparait progressivement une fraction d'eau solvante dont la disponibilité est beaucoup plus élevée permet le développement des microorganismes (**Guilbot et Lindenberg, 1960**). Dans de nombreux secteurs, la durée de conservation pourra être considérablement augmentée par abaissement de l' $a_w$ , quelle que soit la technique mise en œuvre pour réduire l'activité de l'eau : séchage, salage, addition d'un agent dépressur de l' $a_w$  par exemple (**Delort et al., 1981**).

### **II.1. La teneur en eau**

La teneur en eau d'un matériau hygroscopique ou l'humidité absolue est définie par la masse, de la quantité d'eau contenue dans un produit, exprimé en pourcentage de la masse sèche de ce produit. Cette valeur est importante pour tous les produits vendus au poids (**Taouti, 2008**), tel que :

$$\mathbf{X_{eq}} = \frac{\mathbf{Mh - Ms}}{\mathbf{Ms}}$$

Avec :

**X<sub>eq</sub>** : Teneur en eau à l'équilibre (% MS)

**M<sub>s</sub>** : Masse sèche (Kg)

**M<sub>h</sub>** : Masse humide (Kg).

## **II.2. Activité de l'eau dans un produit**

L'absorption de la vapeur d'eau par les aliments est importante dans les processus de déshydratation, de conditionnement et de changement de la qualité du produit pendant le stockage (**Amaral et al., 1999**). L'activité de l'eau du système vapeur-solide est définie par le rapport entre la pression partielle P et la pression de vapeur d'eau P<sub>0</sub>, à l'équilibre donné par la relation suivante :

$$\mathbf{A_w = P/P_0 = HR\%/100}$$

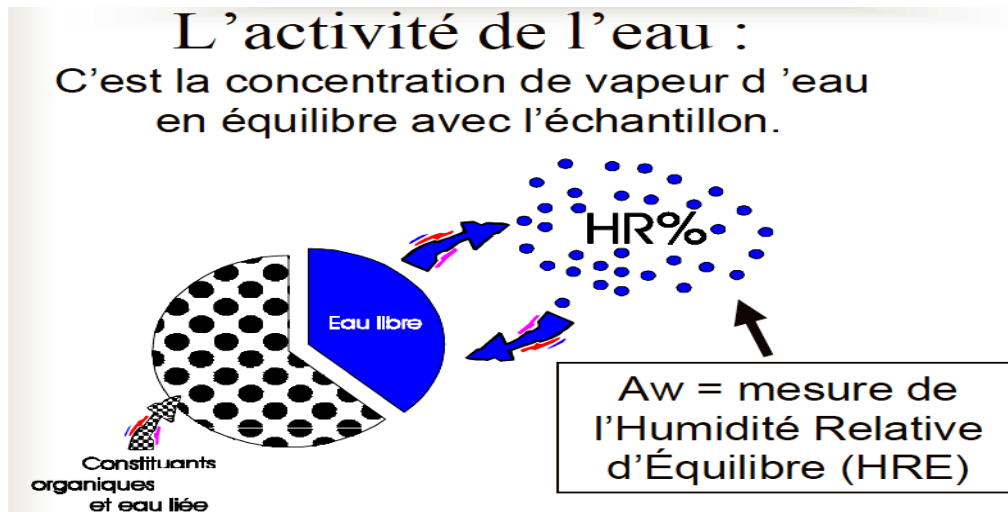
Où

**HR(%)** : Pourcentage de l'humidité relative de l'atmosphère environnante

Le rapport **a<sub>w</sub> = P/ P<sub>0</sub>** qui définit l'activité de l'eau dans le produit, compris entre 0 et 1, est d'autant plus faible que les forces de liaisons internes sont intenses et tend au contraire vers l'unité lorsqu'on se rapproche de l'état libre (**Saravacos, 1995**).

L'activité de l'eau détermine directement les propriétés physiques, mécaniques, chimiques et microbiologiques d'un matériau hygroscopique (**Taouti, 2008**).

L'activité de l'eau d'un aliment dépend de la température. Un changement de 10°C peut causer un changement dans l'**a<sub>w</sub>** de 0,03 à 0,2 dépendant du type du produit. Ainsi, la modification de la température peut avoir un effet sur la stabilité d'un produit et joue un rôle important dans la conservation des produits dans un emballage hermétique (**Alais Charles et al., 2008**).



**Figure n°8 :** Représentation graphique de l'activité de l'eau.

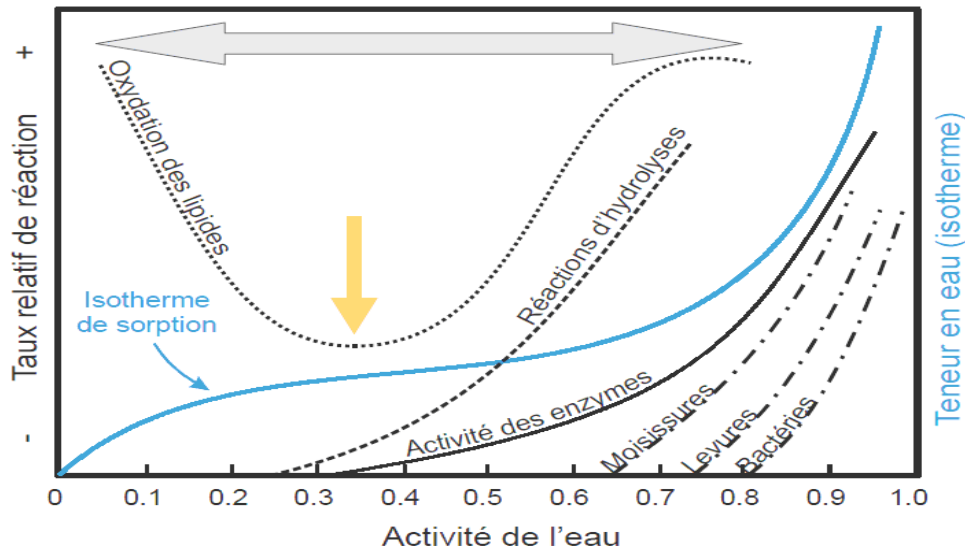
### II.2.1. Méthodes de mesure de l'Aw

L'activité de l'eau peut être déterminée par des méthodes directes (manométriques), qui consistent à mesurer la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'atmosphère en équilibre avec le produit, ou par des méthodes indirectes, pour lesquelles la variable mesurée est corrélée à la pression partielle de vapeur d'eau dans l'atmosphère (humidité relative, température de rosée...). Les principes des différentes méthodes ainsi qu'une analyse critique des avantages et inconvénients de chaque méthode sont largement disponibles dans la littérature (**Labuza et al., 1981 ; Morin, 1983**).

La méthode la plus appropriée pour la mesure de l'aw des produits alimentaires solides est la méthode gravimétrique. Elle consiste à mettre le produit en équilibre avec l'atmosphère d'une micro-enceinte à température constante contrôlée. Lorsque l'équilibre entre la pression de vapeur d'eau dans le produit et la pression partielle de vapeur d'eau de l'enceinte est effectivement réalisé, le potentiel chimique de l'eau est identique dans le gaz et dans le produit.

## II.2.2. Activité de l'eau et réactions de détérioration des aliments, en particulier à l'état déshydraté

L'importance de l'activité de l'eau pour la stabilité des denrées alimentaires lors des traitements et de l'entreposage est illustrée de manière très évidente par les courbes de la Figure n°9.



**Figure n°9 :** Vitesse de détérioration des aliments en fonction de l'activité d'eau (Labuza et al., 1981).

On peut noter que la vitesse de détérioration n'est pas toujours proportionnelle à l'activité de l'eau. En pratique, on considère souvent qu'une stabilité maximum est atteinte au niveau de la couche monomoléculaire de l'eau. Les aliments lyophilisés, par exemple, sont généralement déshydratés jusqu'à cette zone ( $a_w=0.1$  à  $0.2$ , selon le produit).

## II.3. Relation entre la teneur en eau et l'activité de l'eau

### II.3.1. Isothermes de sorption

L'isotherme de sorption d'un produit est la courbe qui relie l'activité de l'eau à la teneur en eau, à une température donnée. Cette relation renseigne sur le comportement hygroscopique du produit. La détermination des isothermes de sorption peut s'effectuer soit par hydratation d'un produit préalablement déshydraté, soit par la déshydratation du produit. On parle alors d'isotherme d'adsorption ou de désorption (Nourhène, 2004).

La courbe représentante pour une température donnée la teneur en eau  $X$  d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau  $a_w$  ou de l'humidité relative de l'air en équilibre HRE est appelée :

- ❖ Isotherme d'adsorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec,
- ❖ Isotherme de désorption si elle a été déterminé expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.

La connaissance de l'isotherme de sorption d'un aliment, en conjonction avec les données de la figure n°9, doit permettre de prévoir le degré de déshydratation le plus favorable pour la stabilité de l'aliment.

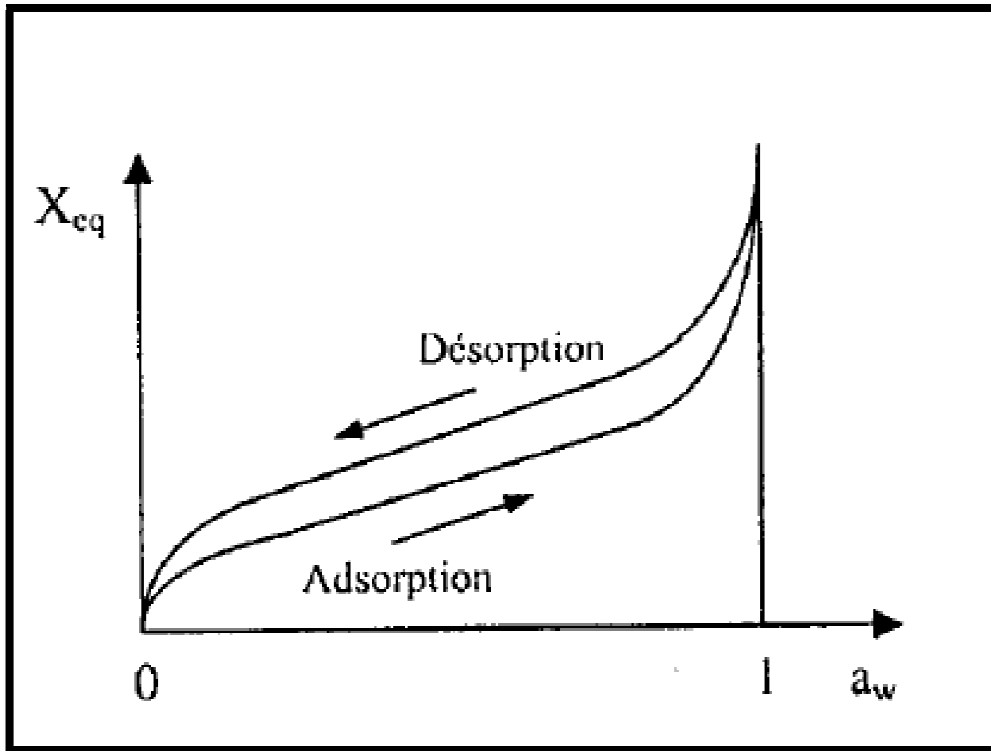
- Pour  $a_w < 0.9$ , la plus part des bactéries nocives cessent de croître dans le produit donné ;
- Pour  $a_w < 0.8$ , beaucoup d'enzymes sont inactives ;
- Pour  $a_w < 0.75$ , la prolifération des bactéries halophiles est arrêtée ;
- Pour  $0.8 < a_w < 0.7$ , les réactions de Maillard (brunissement non enzymatiques des sucres en présence de groupements aminés) présentent un maximum.

La zone optimale de conservation des produits, sans additif ni réfrigération, correspond à des valeurs d'activité  $a_w$  comprises entre 0.25 et 0.35 (Alais Charles et al., 2008).

### **II.3.1.1. Phénomène de l'hystérésis**

Les courbes de sorption et de désorption ne coïncident pas ; en effet lors de la désorption, l'équilibre s'établit, pour une même teneur en eau, à une pression de vapeur plus faible que lors de l'adsorption. Le phénomène d'hystérésis ne s'observe que pour des activités de l'eau supérieures à 0,2-0,3, c'est-à-dire lorsque l'eau est faiblement liée. De plus, ce phénomène lorsque des cycles de sorption-désorption sont répétés sur le même échantillon.

Ce phénomène s'explique notamment par le fait que le diamètre des pores des tissus étant plus faible en surface qu'en profondeur, la pression de vapeur d'eau nécessaire au remplissage est plus élevée que celle à laquelle ils se vident. Ces pressions partielles dépendent du diamètre de l'orifice et de la tension superficielle (Alais et al., 2008).

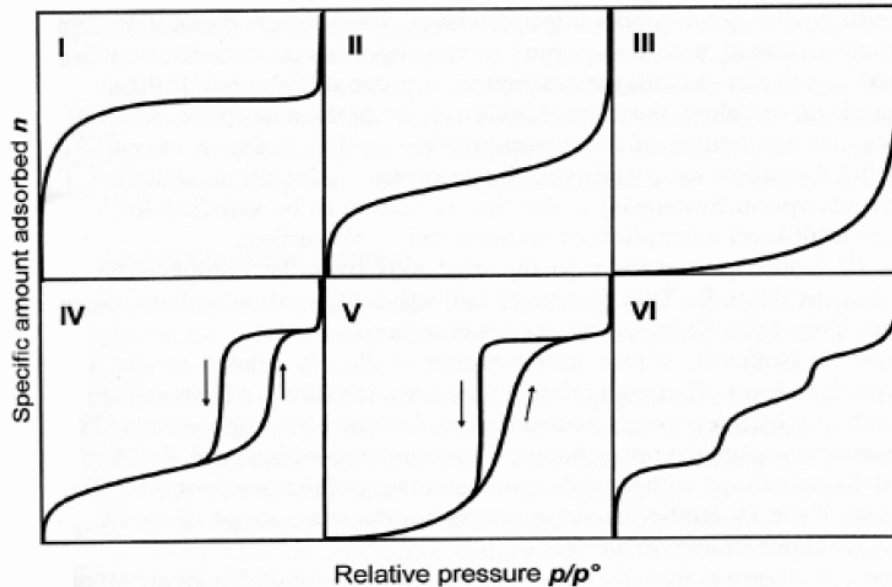


**Figure n°10 :** Isotherme de sorption illustrant le phénomène d'hystérésis.

Pour un produit donné et pour une température déterminée la courbe d'isotherme d'adsorption est décalée par rapport à celle de désorption. Cette non coïncidence des courbes est appelée : *hystérésis*, figure (IV.3), pour une même teneur en eau, l'équilibre lors de la désorption s'établit à une valeur d' $a_w$  plus faible que lors de l'adsorption (Multon, 1982).

### II.3.1.2 .Typologie

L'isotherme de sorption est ainsi le reflet des interactions entre un solide et un adsorbat. On admet généralement la classification suivante :



**Figure n°11:** Différents types d'isothermes de sorption.

● **Type I :** Le milieu ne contient que des micropores saturés pour de faible valeur de  $p/p_s$ , il ne se produit ensuite aucune adsorption pour les valeurs les plus élevées qui permettraient de remplir des mésopores ;

● **Type II :** Le milieu est non poreux ou macroporeux, cette isotherme est caractéristique d'une adsorption multimoléculaire : épaissement progressif de la couche adsorbée ;

● **Type III :** Le milieu est du même type que pour les isothermes de type 2 mais les interactions milieu poreux / gaz adsorbé sont faibles. Ce type d'isothermes est rarement rencontré ;

● **Type IV :** L'isotherme est identique à celle du type 2 aux basses pressions, un palier de saturation se développe aux hautes pressions. Elle correspond à un milieu mésoporeux dans lequel se produit une condensation capillaire. Le phénomène n'est pas réversible, on observe en général une hystérésis entre les courbes d'adsorption et de désorption ;

● **Type V :** Le milieu est de même type que les isothermes de type 4 mais les interactions milieu poreux / gaz adsorbés sont faibles. Ce type d'isothermes est rarement rencontré ;

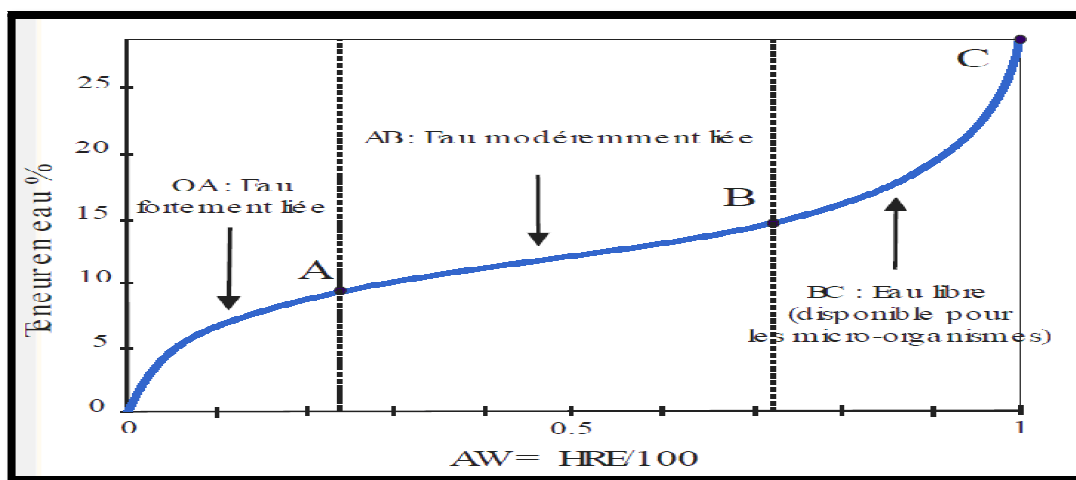
● **Type VI :** Cette isotherme correspond à un milieu poreux dans lequel les couches adsorbées se forment les unes après les autres.



La plupart des produits alimentaires présentent un comportement de type II ou III. Ces deux derniers types d'isothermes se caractérisent par un comportement asymptotique dans le domaine des grandes valeurs  $a_w$  dans lequel l'eau se comporte comme de l'eau pure. L'isotherme réelle obtenue expérimentalement ne correspond que rarement de manière rigoureuse à l'un des types précités. Il faut donc interpréter chaque portion de l'isotherme en fonction des isothermes types pour interpréter un isotherme expérimentale (Brunauer et al., 1983).

### II.3.1.3. Les différentes parties de l'isotherme de sorption

Les isothermes de sorption, qui représentent la teneur en eau d'un produit en fonction de l'activité, renseignent sur l'état de ce composant dans un aliment. Les courbes de sorption de la plupart des produits biologiques présentent une forme sigmoïde ainsi qu'il apparaît dans la Figure12.



**Figure n°12** : Représentation graphique des différentes parties de l'isotherme de sorption (Baldet, 2004).

L'interprétation de la courbe permet de distinguer :

- ✓ *L'eau fortement liée* qui correspond aux faibles valeurs d'  $a_w$ , de 0 à 0.2-0.3. Cette eau se présente sous forme d'une couche monomoléculaire fixée sur les groupements polaires de certains composants. Elle est très peu disponible en tant que solvant et réactif ;
- ✓ *L'eau faiblement liée*, sous forme de plusieurs couches successives fixée sur la première couche par des liaisons d'hydrogène. Elle est considérée également comme eau faiblement

liée à la vapeur d'eau condensée dans les pores des aliments. En dépit de valeur d'  $a_w$  assez basses, cette eau est disponible en tant que solvant ou réactif ;

✓ *L'eau libre* qui correspond à des  $a_w$  supérieures à 0.5. Les forces qui la retiennent sont simplement de nature capillaire ou osmotique (Cheftel, 1977).

✓

### **II.3.1.4. Représentation mathématique des isothermes de sorption**

#### **c) Chaleur de sorption**

Les données des isothermes de sorption sont exploitées pour déterminer la chaleur de sorption de l'eau des fruits séchés. Cette détermination est indispensable pour une meilleure conduite des opérations de séchage et de stockage des fruits. Elle est utilisée pour déterminer l'énergie nécessaire pour la désorption et pour prévoir l'état de l'eau dans les fruits séchés (Tsamis et al., 1990). A cette teneur en eau constante, la pression de la vapeur saturante diminue avec l'augmentation de la température. Il est donc possible de calculer la chaleur isostérique  $Q_{st}$  qui représente l'énergie de fixation de l'eau au substrat et donc la chaleur supplémentaire à la chaleur de vaporisation de l'eau pure nécessaire pour déshydrater le produit.  $Q_{st}$  peut être calculée en utilisant les courbes de sorption obtenues à différentes températures et l'équation de Clausius-Clapeyron (Kechaou et al., 1996 et Rochamier, 1993).

$$\ln\left(\frac{a_w 1}{a_w 2}\right) = \left(\frac{\Delta H_b}{R}\right) \times \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

Où  $\Delta H_b = Q_{st} - \Delta H_0$

$a_w 1$  et  $a_w 2$  sont les deux activités de l'eau correspondant à une teneur en eau aux températures  $T_1$  et  $T_2$ .  $\Delta H_b$  correspond à l'enthalpie de vaporisation de l'eau et  $R$  la constante universelle des gaz parfaits. La valeur de  $Q_{st}$  (KJ /mol) augmente généralement à mesure que le degré de déshydratation augmente (Kiranoudis et al., 1993).

#### **d) Modèles théoriques d'isothermes**

De très nombreux essais de modélisation mathématique ont été tentés, deux voies ont été explorées, la première consiste à conduire des équations théoriques intégrant des propriétés caractéristiques de l'adsorption, la deuxième voie, plus utile en pratique, consisterait à ajouter aux résultats expérimentaux une équation empirique.

❖ **Modèle B.E.T**

Parmi les modèles proposés dans la littérature, le modèle le plus souvent appliqué aux fruits et aux aliments est celui de **Brunauer, Emmett et Teller (1938)**. Cette équation fournit la valeur de la teneur en humidité des couches superficielles (monocouche), qui est un paramètre important dans l'étude des détériorations des aliments.

L'équation suivante donne la teneur en eau du produit X ( g/100g de matière sèche) :

$$X = \frac{X_m \cdot C \cdot a_w}{(1-a_w) \cdot (1-a_w + C \cdot a_w)}$$

**C** : Constante de la B.E.T.

**X<sub>m</sub>**: Teneur en eau correspondant à la couche monomoléculaire (g/100 g de matière sèche).

Le modèle B.E.T est connu pour être utilisé pour des  $a_w$  ne dépassant pas 0,5 (**Iglesias et al., 1982**). L'application de données de sorption avec l'équation du B.E.T, même dans cette zone des activités basses, n'est pas toujours satisfaisante.

❖ **Modèle G.A.B**

Ces dernières années, le modèle le plus utilisé pour les isothermes de sorption a été le modèle de G.A.B (Guggenheim, Anderson et Boer, 1938) (**Labuza et al., 1985**). Ce modèle est l'un des meilleurs modèles théoriques pour les aliments. Il est utilisé et accepté en technologie alimentaire par tous les chercheurs en Europe (**Bizot, 1989**). Il est applicable pour les activités de l'eau comprises entre 0.05 et 0.95. Ce modèle permet non seulement de calculer la teneur en eau de la couche monomoléculaire, mais permet aussi de déterminer la chaleur de sorption de la couche monomoléculaire et de la multicouche.

L'équation de G.A.B est la suivante :

$$X = \frac{X_m \times C \times K \times a_w}{(1-K \times a_w) \times (1-K \times a_w + C \times K \times a_w)}$$

Où :

**X** : Taux d'humidité du produit.

**X<sub>m</sub>**: Teneur en eau correspondante à l'occupation de tous les sites de sorption de la couche monomoléculaire de l'eau dans le produit (exprimée en % par rapport à la matière sèche) ;

**a<sub>w</sub>** : Activité de l'eau ;

**C** : Constante de G.A.B. ;

**K** : Facteur correctif aux propriétés de la multicouche (**Kiranoudis et al., 1993**).

K augmente avec l'élévation de la température. Du point de vue énergétique, cela correspond à l'affaiblissement des liaisons entre l'eau et les sites de sorption avec la température (**Bizot, 1983**).

Les trois constantes de G.A.B dépendent des caractéristiques du produit et de la température. Elles sont déterminées à partir des résultats expérimentaux. Le taux d'humidité de la couche monomoléculaire obtenu par l'équation de G.A.B, ne diffère pas de celui obtenu par l'équation de B.E.T à un niveau de 95%, signification pour chaque température (**Labuza et al., 1985**).

La teneur en eau de la couche monomoléculaire (X<sub>m</sub>) est déterminée à partir des équations de B.E.T et G.A.B qui décrivent l'isotherme de sorption. Elle représente la quantité d'eau adsorbée sur des sites hydrophiles disponibles à la surface de l'adsorbant (**Tsamis et al., 1990**).

### **II.3.1.5. Intérêt pratique des isothermes de sorption pour la technologie alimentaire**

Les isothermes de sorption sont utiles à divers titres. En premier lieu elles corroborent dans plusieurs cas les interprétations théoriques, et permettent par exemple de calculer le nombre de sites actifs ou la surface effective d'un produit. Cela intéresse aussi l'adsorption de substances volatiles ou de gaz comme divers composés aromatiques, l'oxygène, l'azote. En second lieu les isothermes permettent de prévoir l'activité de l'eau de mélanges de divers ingrédients plus ou moins humides.

Enfin les isothermes d'adsorption donnent la possibilité de faire des prévisions sur le comportement d'un aliment, lors d'un traitement ou de l'entreposage, dans des conditions autres que celles qui ont été étudiées expérimentalement. Ce troisième aspect présente un intérêt pratique évident. Voici quelques exemples concernant principalement l'entreposage :

- Les courbes d'adsorption permettent de prévoir l'influence des variations de l'humidité relative ambiante sur la teneur en eau d'un produit non protégé ; elles indiquent donc l'hygroscopicité du produit ;
- Si la déshydratation d'un produit a été effectuée au delà d'un point optimum  $M_0$ , on peut prévoir que la réhumidification jusqu'à la teneur en eau correspondant à  $M_0$  peut conduire, du fait de l'hystérésis, à une activité de l'eau dangereusement élevée. cet écart d'activité de l'eau est surtout important dans le cas des fruits et des légumes, riche en sucre et en sels. La différence de teneur en eau à l'adsorption et à la désorption pour une même humidité relative est d'environ 1% par rapport au poids sec ;
- Il est aussi possible de prévoir l'influence des variations de température sur l'activité de l'eau d'un produit conditionné dans un emballage étanche, et donc de teneur en eau constante : cette influence n'est notable que dans la zone où  $a_w$  soit inférieure à 0.5, sauf dans le cas des aliments très riches en sucres (**Bizot,1983**).

## **I. Matériel végétal**

Pour toute l'expérimentation nous avons utilisé des pommes de terre de la variété *Spunta* provenant du marché de frais d'El Harrach.

## **II. La déshydratation osmotique de la pomme de terre**

### **II.1. Matériel technique**

#### **II.1.1. Détermination du taux d'humidité**

La détermination du taux d'humidité des échantillons se fait à l'aide d'un humidimètre, un appareil à infrarouge de type SARTORIUS MA.

#### **II.1.2. Thermoanémomètre**

C'est un appareil de série TESTO qui permet la mesure de la température de la solution de déshydratation.

### **II.2. Protocole expérimental**

#### **II.2.1. Préparation des solutions osmotiques**

Afin de montrer l'influence du type de l'agent osmotique sur la déshydratation osmotique nous avons utilisé deux solutions :

- la première solution est constituée de saccharose dissout dans l'eau distillée à différentes concentrations : 40, 50 et 60% correspondant à 40, 50 et 60° Brix. Pour éviter la cristallisation du sucre pendant la déshydratation osmotique, on ajoute 10ml d'une solution d'acide citrique à 2% ;
- La deuxième solution est constituée de sel de table NaCl dissout dans l'eau distillée avec les concentrations suivantes : 5, 10 et 15%.

#### **II.2.2. Préparation des échantillons**

Les pommes de terre sont épluchées, rincées avec l'eau distillée puis découpées en cubes de 1cm<sup>3</sup> et de 2,2g. L'humidité initiale des cubes est 78.1%.

Pour montrer l'influence de la forme géométrique des échantillons de pomme de terre sur la déshydratation osmotique, nous avons préparé des rondelles de pomme de terre de 0,5mm d'épaisseur tout en gardant le même poids que celui des cubes.



**Figure n°13 :** Rondelles et cubes de pomme de terre avant la déshydratation osmotique

### **II.2.3. Les prétraitements utilisés**

Les cubes et les rondelles de pommes de terre subissent un blanchiment dans l'eau à 100°C pendant 30 secondes puis introduits dans l'eau glacée pour arrêter l'effet du blanchiment. Afin d'éviter les réactions du brunissement non enzymatique les échantillons sont immergés dans une solution de métabisulfite de sodium à 1% pendant 1 seconde puis rincés avec l'eau distillée. Après tous ces prétraitements, les cubes de pomme de terre subissent la déshydratation osmotique à 20, 40, 60°C dans les deux solutions de déshydratation :

- des sirops de saccharose à 40, 50, 60 °B ;
- des solutions d'eau salée (NaCl) à 5, 10, 15%.

Pour les rondelles de pomme de terre, la déshydratation osmotique est conduite dans des sirops de saccharose à 40, 50, 60 °B.

Le rapport du produit alimentaire et la solution de déshydratation est de 1:5

Les échantillons pesés, blanchis sont immergés dans la solution de déshydratation, puis mis dans un bain marie avec une agitation d'une vitesse de 150 tours/ minute pendant une durée de 80, 150 et 300 minutes. Le dispositif utilisé est un ensemble d'agitateur et de bain marie, représenté par la figure n°14.



**Figure n°14:** Dispositif utilisé pour la déshydratation osmotique.

Pour chaque expérience, les échantillons sont retirés de la solution osmotique chaque 40 minutes, séchés avec du papier buvard, puis pesés à l'aide d'une balance SARTORIUS, ensuite ils sont remis dans la solution jusqu'à l'achèvement de la durée de l'expérience.

A la fin de cette dernière, un échantillon est utilisé pour la détermination de la teneur en eau avec l'humidimètre à infrarouge.

Les données expérimentales obtenues sont traitées à l'aide de *Microsoft Excel*, *Statistica 9.0* et *Design expérimental (design-expert 8.0.6 Trial)*, pour construire les courbes de variation de la perte en eau, la perte en poids et le gain en solides en fonction du temps, de la température, de la concentration de la solution et pour déterminer les paramètres des équations correspondantes aux différentes régressions.

### **II.3 Cinétique de la déshydratation osmotique partielle en continu**

Les principaux paramètres utilisés pour étudier le transfert de masse durant le processus de la déshydratation osmotique sont : la perte en poids (**PP**), la perte en eau (**PE**) et le gain en substances solides solubles (**GS**).

#### **II.3.1. La modélisation mathématique de la cinétique de la déshydratation osmotique partielle en continue selon AZUARA et al., (1998)**

En 1969, Ferkas et Lazar ont introduit une équation empirique qui permettait le calcul du temps de l'immersion dans une solution de saccharose en fonction de la concentration, et en tenant compte de la perte en poids et en température, **Hawkes et Flink (1978)**, **Crank (1979)** ont élaboré des modèles théoriques de la cinétique de la perte en eau et du gain en soluté qui sont basés sur l'utilisation de loi de diffusion de Fick pour des transferts monodirectionnels en régime non stationnaire. **Pavasovic V., et al. (1986)** ont décrit la



## *Etude expérimentale*

### *Matériels et méthodes*

cinétique des échanges durant l'osmose des pommes dans un sirop de saccharose pour des courtes durées de traitement. **Marcotte et al.,(1991)** ont proposé un modèle basé sur le potentiel chimique de thermodynamique.

L'application de l'équation théorique de diffusion basée sur la loi de Fick est généralement difficile à appliquer en expérimentation. Pour contourner cette difficulté, **AZUARA et al. (1992)** ont proposé un modèle pour déterminer certains paramètres de transfert de masse durant la période dynamique de la déshydratation osmotique. La modélisation mathématique utilisée par **AZUARA et al.,(1998)** est basée sur les équations suivantes, sachant que le calcul de la perte en eau et du gain en solide pendant la déshydratation osmotique partielle fait appel à deux équations avec deux paramètres obtenus à partir du calcul de masse :

$$PEf = \frac{S1 \times t \times PEe}{1 + S1 \times t} \quad (1)$$

$$GSf = \frac{S2 \times t \times GSe}{1 + S2 \times t} \quad (2)$$

Avec

**t** : le temps,

**S1**: Constante relative à la perte en eau,

**S2** : Constante relative au gain en solide,

**PEf** : La totalité de l'eau perdue par le fruit au temps t (en pourcentage, fraction, g ou kg),

**GSf** : La totalité du soluté gagné par le fruit au temps t (en pourcentage, fraction, g ou kg),

**PEe** : La totalité de l'eau perdue à l'équilibre,

**GSe** : La totalité de soluté gagné à l'équilibre.

La perte en poids (PP) durant la déshydratation osmotique est égale à la différence entre la perte en eau (PE) et le gain en soluté (GS) :

$$PP = PE - GS. \quad (3)$$

En soustrayant Eqn (1) de Eqn (2) et après réarrangement on obtient:

$$PP = \frac{S1 \times PEe \times \left(1 - \frac{GS}{PE}\right)}{1 + S1 \times t} \quad (4)$$

L'équation (4) peut être écrite sous la forme suivante:

$$PP = \frac{S2 \times GSe \times \left(\frac{PE}{GS} - 1\right)}{1 + S2 \times t} \quad (5)$$

La linéarisation des équations (4) et (5) donne :

$$t/PP = \left[ \frac{1}{S1 \times PEe \times (1 - (GS/PE))} + \frac{t}{PEe \times (1 - (GS/PE))} \right] \quad (6)$$

De même:

$$t/PP = \left[ \frac{1}{S2 \times GSe \times \left(\frac{PE}{GS} - 1\right)} + \frac{t}{GSe \times \left(\frac{PE}{GS} - 1\right)} \right] \quad (7)$$

P étant la pente de la courbe trace de t/PP et b étant l'intersection on peut définir les paramètres suivants:

$$PEe = \frac{(1/p)}{\left[1 - \left(\frac{GSf}{PEf}\right)^m\right]} \quad (8)$$

$$S1 = \frac{(1/b)}{PEe \times \left[1 - \left(\frac{GSf}{PEf}\right)^m\right]} \quad (9)$$

$$GSe = \frac{(1/p)}{\left[\left(\frac{PEf}{GSf}\right)^m - 1\right]} \quad (10)$$

$$S2 = \frac{(1/b)}{GSe \times \left[\left(\frac{PEf}{GSf}\right)^m - 1\right]} \quad (11)$$

La souscription m indique que PE et GS sont déterminés pour le dernier point de l'expérience, en utilisant les équations de **BERISTAIN et al. 1990** :

$$\frac{PE}{m_0} = \frac{M_0 \times C_0 - M_f \times C}{M_0} \quad (12)$$

$$\frac{GS}{m_0} = \frac{M_0 \times (C_0 - 1) - M_f \times (C_f - 1)}{M_0} \quad (13)$$

Où:

$M_0$ : Poids initial du fruit ( $t = 0$ ),

$M_t$ : Poids du fruit au temps  $t$ ,

$C_0$  : Humidité initiale du fruit et  $C_f$  : humidité finale du fruit au temps  $t$ .

Etant les paramètres S1, S2, PEF et GSf connus, il est possible de calculer la perte en eau et le gain de solide pour n'importe quel temps

$C_f$  : Peut-être prédite on utilisant l'équation suivante :

$$C_f = \frac{M_0 \times c_0 - PP \times M_0}{M_t} \quad (14)$$

La perte en poids (PP) est calculée par rapport à la perte de masse nette de l'échantillon (M) sur la masse initiale de l'échantillon ( $M_0$ ):

$$PP = \frac{M_0 - M}{M_0} \quad (15)$$

### **II.3.2. La modélisation des surfaces de réponse**

La méthodologie des surfaces de réponse a été utilisée pour estimer les effets principaux des différents facteurs du processus (température, temps et concentration en agent osmotique) sur la perte d'eau (PE), la perte en poids (PP) et le gain de solide (GS) durant la déshydratation osmotique des échantillons.

#### **II.3.2.1. Le design expérimental**

Les surfaces de réponse sont obtenues à l'aide du logiciel **design expérimental 8.0.6 Trial**, ce qui permet de visualiser les effets combinés de deux facteurs sur la réponse. Les surfaces de réponses ont été déterminées pour la perte en eau, en poids et le gain en solide en fonction de deux facteurs (température, temps), (température, concentration), (temps, concentration), tout en gardant le troisième à des valeurs constantes.

##### **II.3.2.1.1 Analyse de la variance**

L'analyse de la variance (terme souvent abrégé par le terme anglais ANOVA : ANalysis Of VAriance) est un test statistique permettant de vérifier que plusieurs échantillons sont issus d'une même population.

Ce test s'applique lorsque l'on mesure une ou plusieurs variables explicatives catégorielles (appelées alors facteurs de variabilité, leurs différentes modalités étant parfois appelées

« niveaux ») qui ont de l'influence sur la distribution d'une variable continue à expliquer. On parle d'analyse à un facteur, lorsque l'analyse porte sur un modèle décrit par un facteur de variabilité, d'analyse à deux facteurs ou d'analyse multifactorielle (**Chessel et Dufour, 2003**).

Elle permet d'étudier le comportement d'une variable à expliquer continue en fonction d'une ou plusieurs variables explicatives catégorielles.

### ❖ Hypothèse à tester

L'hypothèse nulle  $H_0$  correspond au cas où les distributions suivent la même loi normale.

L'hypothèse alternative  $H_1$  est qu'il existe au moins une distribution dont la moyenne s'écarte des autres moyennes :

$$\begin{cases} H_0 : m_1 = m_2 = \dots = m_k = m \\ H_1 : \exists(i, j) \text{ tel que } m_i \neq m_j \end{cases}$$

### ❖ Décomposition de la variance

La première étape de l'analyse de la variance consiste à expliquer la variance totale sur l'ensemble des échantillons en fonction de la variance due aux facteurs (la variance expliquée par le modèle), de la variance due à l'interaction entre les facteurs et de la variance résiduelle aléatoire (la variance non expliquée par le modèle).  $S_n^2$  étant un estimateur biaisé de la variance, on utilise la somme des carrés des écarts (SCE en français, *SS* pour *Sum Square* en anglais) pour les calculs et l'estimateur non biaisé de la variance  $S_{n-1}^2$  (également appelé *carré moyen* ou *CM*).

L'écart d'une mesure est la différence entre cette mesure et la moyenne :

$$e = y_{ijk\dots} - \bar{y}$$

La somme des carrés des écarts SCE et l'estimateur  $S_{n-1}^2$  se calculent à partir des formules :

$$SCE = \sum_{ijk\dots} (y_{ijk\dots} - \bar{y})^2 \quad \text{et} \quad S_{n-1}^2 = \frac{SCE}{n-1}$$

Il est alors possible d'écrire la somme des carrés des écarts total  $SCE_{total}$  comme étant une composition linéaire de la somme des carrés des écarts de chaque variable explicative  $SCE_{facteur}$  et de la somme des carrés des écarts pour chaque interaction  $SCE_{interaction}$  :

$$SCE_{total} = \sum_i SCE_{facteur_i} + \sum_{ij} SCE_{interaction_{ij}}$$

Cette décomposition de la variance est toujours valable, même si les variables ne suivent pas de loi normale.

### ❖ Test de Fisher

Par hypothèse, la variable observée  $y_i$  suit une loi normale. La loi du  $\chi^2$  à  $k$  degrés de liberté étant définie comme étant la somme de  $k$  lois normales au carré, les sommes des carrés des écarts  $SCE$  suivent des lois du  $\chi^2$ , avec  $DDL$  le nombre de degrés de liberté :

$$SCE \sim \chi^2(DDL)$$

La loi de Fisher est définie comme le rapport de deux lois du  $\chi^2$ . Dans le cas de l'hypothèse nulle  $H_0$ , le rapport entre deux estimateurs non biaisés de la variance  $S_{DDL}^2$  doit donc suivre une Loi de Fisher :

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} = \frac{\frac{SCE_1}{DDL_1}}{\frac{SCE_2}{DDL_2}} \sim F(DDL_1, DDL_2)$$

Si la valeur de  $F'$  n'est pas compatible avec cette loi de Fisher (c'est-à-dire que la valeur de  $F$  est supérieure au seuil de rejet), alors on rejette l'hypothèse nulle : on conclut qu'il existe une différence statistiquement significative entre les distributions. Le facteur de variabilité ne sépare pas la population étudiée en groupes identiques. Pour rappel, la valeur de seuil de rejet  $F_\alpha(DDL_1, DDL_2)$  est précalculée dans les tables de référence, en fonction du risque de première espèce  $\alpha$  et des deux degrés de libertés  $DDL_1$  et  $DDL_2$  (Scherrer B., 1984).

### III. Isotherme de désorption

Les isothermes de sorption sont d'une grande importance dans les industries agro-alimentaires et notamment dans les opérations de séchage, de stockage et de conservation des aliments. L'étude des isothermes de sorption permet d'assurer un meilleur stockage des denrées et une détermination rationnelle des limites de séchage (Adambounou et al., 1983). Dans le cas des fruits et légumes, il est nécessaire de connaître l'allure des isothermes de désorption dans la plage de température de 40 à 70 °C atteintes par ces produits au cours du séchage (Do Amaral Sobral J.P et al., 1999).

#### III.1. Objectif

L'objectif visé par cette étude est la détermination expérimentale des isothermes de désorption de la variété de pomme de terre *Spunta* à 40 et 60°C par la méthode statique standardisée.

#### III.2 Principe

L'étude consiste à amener la phase vapeur des pommes de terre humide à un équilibre avec une atmosphère d'humidité relative puis déterminer leur teneur en eau à l'équilibre par

une méthode gravimétrique dans laquelle le poids est surveillé de manière discontinue dans un système statique standard de dessiccateur thermiquement stabilisé (Wolf, Spiess et Jung, 1985).

### **III.3. Dispositif expérimental et méthodologie**

Lapomme de terre utilisée est de la variété *Spunta*. Les cubes de cette dernière subissent des prétraitements : un blanchiment de 60 secondes, puis une déshydratation osmotique dans une solution de saccharose à 50 °Brix et une température de 40°C pendant 80 min.

La désorption est conduite dans des enceintes qui maintiennent à une température et une humidité relative constante, le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre. Six hygromètres de un litre (cuve en verre) ont été utilisés (pour une température). Chaque hygromètre contient une solution d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) à une concentration bien déterminée pour prévenir une humidité relative constante bien définie (Figure n°15).



**Figure n°15:** Dispositif expérimental de détermination des isothermes de désorption.

### **III.4. Détermination de l'isotherme de désorption**

Nous avons utilisé des morceaux de pomme de terre déshydratés osmotiquement d'environ 0,5g ayant une teneur en eau de 67,02%. Chacun des six hygromètres utilisés contient 100 ml d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) à une concentration de 96 % et trois échantillons (3 capsules/ hygromètre). A des  $a_w$  élevés ( $a_w > 0.7$ ), des cristaux de thymol ont été placés dans les hygromètres pour éviter le développement des moisissures. Les hygromètres ainsi préparés sont placés dans une étuve réglée aux températures désirées (40 et 60°C).

## *Etude expérimentale*

### *Matériels et méthodes*

Pour éviter de perturber le phénomène de mise à l'équilibre, l'échantillon n'est sorti qu'une fois par 24 heures pour l'opération de pesée qui ne dure pas plus de 4 secondes.

L'équilibre est atteint dans 21 jours (lorsque la différence de masse entre trois pesées consécutives était inférieure à 2%).

Les teneurs en eau à l'équilibre  $X_{eq}$  sont déterminées à l'aide de l'humidimètre à infrarouge.

L'effet de la température et la concentration de l'acide sulfurique sur l'équilibre des valeurs des humidités relatives des solutions d'acide sont représentées dans le tableau n°5.

**Tableau n°5 :** Valeurs de l' $a_w$  de solution d'acide sulfurique en fonction de la concentration (% volume/volume) et de la température (Multon et al., 1980).

Concentration % (volume/volume)	Activités de l'eau $A_w$		
	25°C	30 °C	40°C
10	94.29	94.27	95.62
20	87.56	87.36	87.85
25	81.66	81.70	83.42
30	74.93	74.79	75.37
35	66.51	66.62	67.42
40	56.83	56.56	57.48
45	45.88	46.19	47.00
50	35.57	35.51	36.69
55	25.89	26.05	26.75
60	16.71	17.00	17.80
65	9.43	9.71	10.23
70	4.34	4.52	4.97
75	1.72	1.82	2.06
80	0.52	0.58	0.69
85	0.16	0.18	0.23
90	0.03	0.04	0.05
95	-	-	0.01



### III.5. L'application des modèles mathématiques

Plusieurs modèles existent dans la littérature pour décrire les isothermes (**Bizot H., 1983 ;Chirife J. &Iglesias H.A., 1978**). Le modèle retenu, celui de Guggenheim, Anderson et de Boer (G.A.B.) présente l'avantage de décrire correctement les isothermes de désorption des produits agroalimentaires jusqu'à des valeurs de l'activité de l'eau atteignant 0,95. Il nécessite le calcul de trois paramètres pour chaque température.

L'équation de G.A.B. a la forme suivante:

$$X = \frac{(X_m \times C \times K \times A_w)}{((1 - K \times A_w) \times (1 - K \times A_w + C \times K \times A_w))} (1^*)$$

Où:

**X** : teneur en eau de la matière à l'équilibre.

**X<sub>m</sub>** : teneur en eau correspondante à l'occupation des sites de sorption de la couche mono moléculaire d'eau dans le produit.

**C** : constante de Guggenheim reliée à la température avec :

$$C = C_0 \times \exp (\Delta H_C / R \times T) \quad (2^*)$$

**K** : facteur correctif aux propriétés de la multicouche avec :

$$K = K_0 \times \exp (\Delta H_K / R \times T) \quad (3^*)$$

$\Delta H_C$  et  $\Delta H_K$  : sont les paramètres de la chaleur de sorption avec :

$$\Delta H_K = (H_L - H_n) \quad (4^*)$$

$$\Delta H_C = (H_m - H_n) \quad (5^*)$$

**H<sub>m</sub>** : Chaleur totale de sorption de la monocouche (J/mole).

**H<sub>n</sub>** : Chaleur totale de sorption de la multicouche (J/mole).

**H<sub>L</sub>**: Chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau (J/mole), soit 43980 J/mole (10500 cal/mole) sur le domaine (20°C ; 80°C).

## *Etude expérimentale*

### *Matériels et méthodes*

**T** : Est la température absolue en degré Kelvin soit 333°K et 313°K respectivement pour 60 et 40°C.

**R** : Est la constante des gaz parfaits soit 8.306 J/mole.°K ou (1.987) cal/mole.°K

A partir des points expérimentaux, le modèle utilisé pour tracer la courbe de désorption des pommes de terre à 40 et 60 °C est celui de GAB.

La qualité de l'ajustement de ce modèle est appréciée par la somme des moindres carrés (SMC).

$$SMC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (M_i - M_{pi} / M_i)^2}{n}} \times 100 \quad (6^*)$$

Où :

**M<sub>i</sub>** : Teneurs en eau expérimentales. **M<sub>pi</sub>** : teneurs en eau prévues.

**n** : Nombre de mesures.

L'évaluation du résultat du lissage peut aussi être exprimé par une valeur (P%) qui exprime la différence entre les données expérimentales et celles prévues, cette constante (P%) est défini par l'équation suivante proposée par **Lomauro et al., (1985)** .

$$P (\%) = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{|M_i - M_{pi}|}{M_i}}{n} \times 100 \quad (7^*)$$

L'autre critère utilisé est le RMS (%) exprimé comme suit :

$$RMS(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \frac{|M_i - M_{pi}|}{M_i}}{n}} \times 100 \quad (8^*)$$

Le dernier critère utilisé est le MSE (%) exprimé comme suit :

$$MSE (\%) = \frac{\sum_{i=1}^m |M_i - M_{pi}|}{n-1} \times 100 \quad (9^*)$$

### **III .6. Calcul de l'énergie nécessaire pour évaporer l'eau**

L'énergie nécessaire pour évaporer l'eau est calculée en utilisant les équations (10) et (11) :

$$Q = H_n \times m_e \quad (10^*)$$

$$me = \frac{mi(mci - mcf)}{100 - mcf} \quad (11^*)$$

avec :

$H_n$  : La chaleur de désorption de la multicouche ;

**me** : Quantité d'eau à évaporer ;

**mi** : Quantité du produit à sécher ;

**mci** : Taux d'humidité initial ;

**mcf** : Taux d'humidité finale .

## **IV. Friture de pomme de terre**

### **IV.1 Principe**

Le procédé de friture consiste à mettre en contact un matériau généralement humide avec une couche (friture plate ou friture à la poêle) ou un bain (friture profonde) de matière grasse portée à une température supérieure à l'ébullition de l'eau. L'huile est utilisée pour transférer de la chaleur au matériau jusqu'à la vaporisation quasi-totale de l'eau contenue dans ce matériau. Cette dernière se produit à une température généralement voisine de la température d'ébullition de l'eau pure pour les matériaux riches en eau et à une température supérieure pour les matériaux à humidité intermédiaire et dont l'eau est fortement adsorbée. Cette dernière s'échappe sous forme de jets de bulles de vapeur caractéristiques du comportement «explosif» de la friture (Graille Jean, 2003).

### **IV.2. Préparation des chips de pomme de terre**

#### **IV.2.1. Matériel technique**

La cuisson des chips ou rondelles de pomme de terre a été effectuée à l'aide d'une plaque chauffante qui permet de stabiliser la température. La friture a été réalisée dans une poêle domestique profonde.

#### **IV.2.2. Protocole expérimental**

Les pommes de terre lavées, épluchées et rincées ont été découpées en tranches de 2mm d'épaisseur à l'aide d'une râpeuse, dans le but de démontrer l'effet de la déshydratation osmotique sur la durée de la cuisson des chips nous avons préparé :

- des chips naturelles sans aucun prétraitement (après la friture, les chips sont saupoudrées de sel)

## *Etude expérimentale*

### *Matériels et méthodes*

- des chips préalablement déshydratées à 40°C, 5% de sel pendant une durée de 300 minutes ;
- des chips préalablement déshydratées à 40°C, 60°B pendant une durée de 300 minutes.

Les rondelles de PT sont déposées sur un torchon et recouvertes avec du papier absorbant pendant deux minutes puis cuites dans l'huile de soja et maïs à une température de 170°C. Les chips sont cuites lorsqu'elles deviennent dorées et quand le silence s'installe dans le bain de friture (**Anonyme, 2011**).

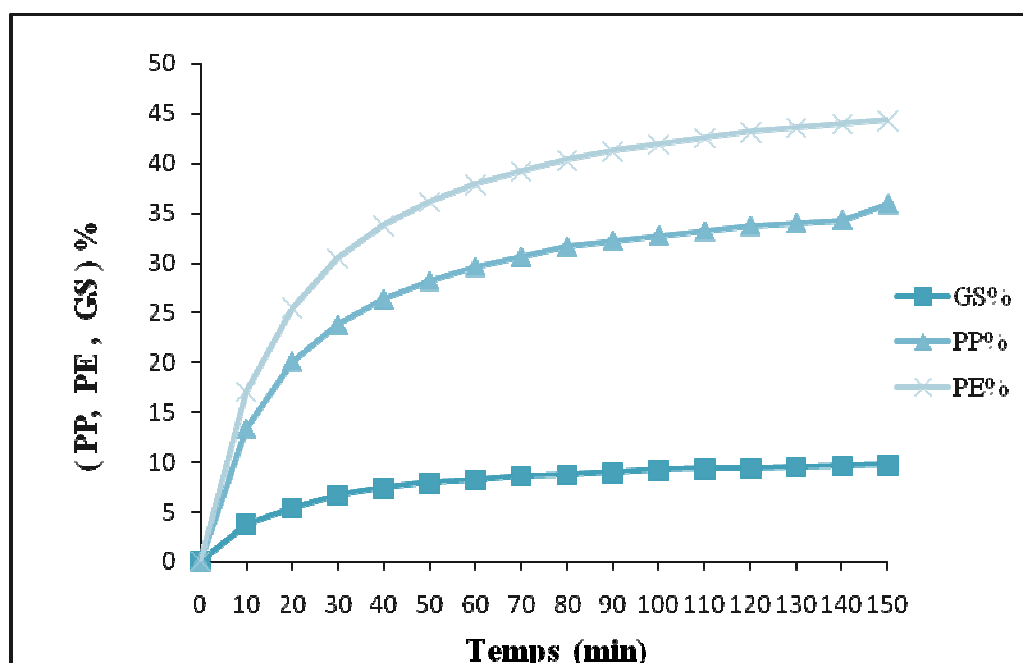


**Figure n°16:** rondelles de pomme de terre avant la friture

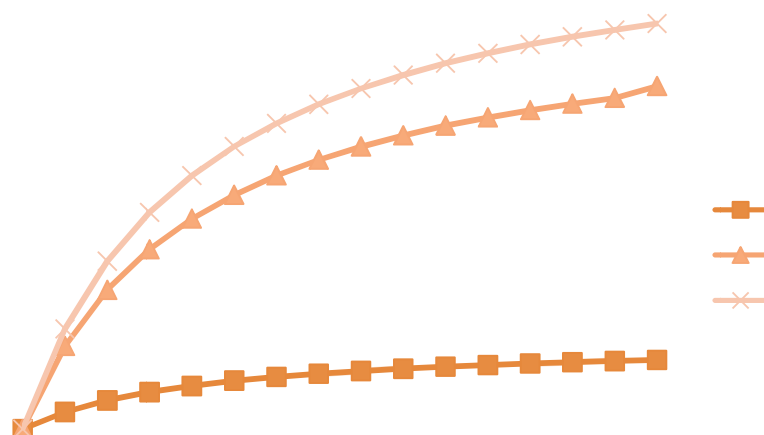
## I. La déshydratation osmotique partielle de la pomme de terre

### I.1. Cinétique de la perte en poids, de la perte en eau et du gain de solide au cours de la déshydratation osmotique

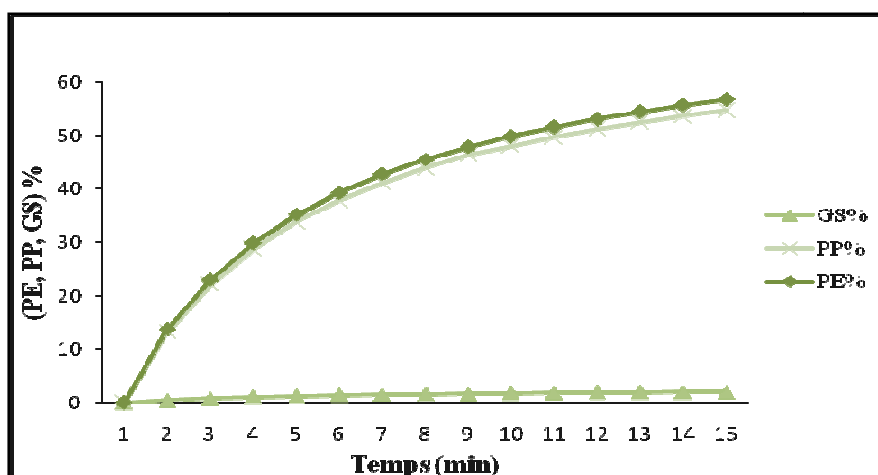
L'évolution des pourcentages de la perte en poids (PP), de la perte en eau (PE) et du gain en solide (GS) calculés par les équations (1), (2), et (3) sont représentés dans les figures 17, 18 et 19. Les pourcentages des pertes en eau des échantillons de pomme de terre en forme de cubes déshydratés dans des solutions concentrées de sel et de saccharose, déterminés après 150min sont respectivement de 44,31% et 53,21%. Quant au gain en solide, les pourcentages sont respectivement de 9,75% et 9,07% (figures 17, 18). En ce qui concerne les échantillons de pomme de terre en forme de rondelles, déshydratés dans une solution concentrée de saccharose, évalué au bout de 150min, la perte en eau est de 57,55%, et le gain en solide est de 2,06% (figure 19).



**Figure n°17:** Evolution de la PP, la PE et le GS en fonction du temps des cubes de pomme de terre déshydratés à 20°C et 5% de sel



**Figure n° 18:** Evolution de la PP, la PE et le GS en fonction du temps des cubes de pomme de terre déshydratés à 60°C et 60°Brix.



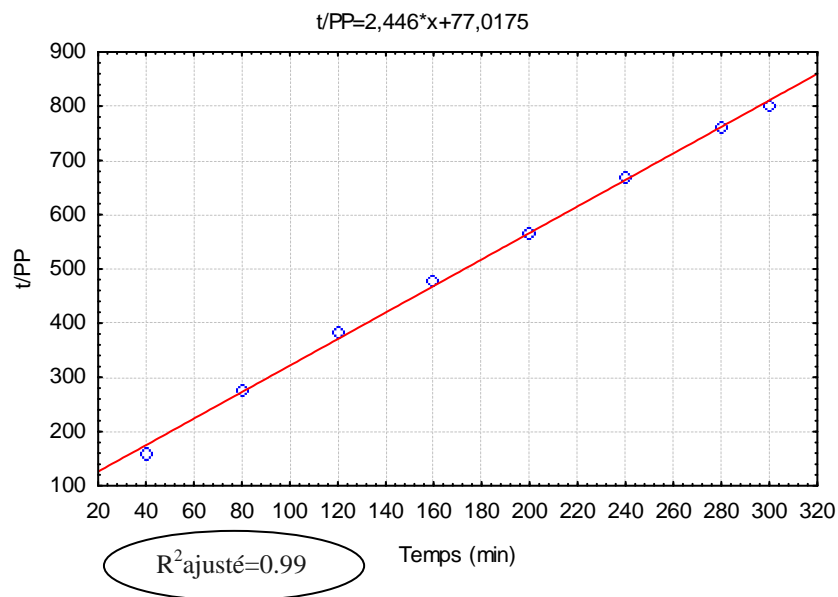
**Figure n° 19:** Evolution de la PP, la PE et GS en fonction du temps des rondelles de pomme de terre déshydratées à 40°C et 50°Brix

D'après ces résultats, les échantillons perdent beaucoup plus d'eau qu'ils ne gagnent en agent osmotique (NaCl ou saccharose). Ce phénomène s'explique selon **Raoult et Wack (1990)** par une augmentation en surface de la concentration en soluté entraînant, ainsi la formation d'un important gradient de concentration au sein de l'aliment accentuant par la

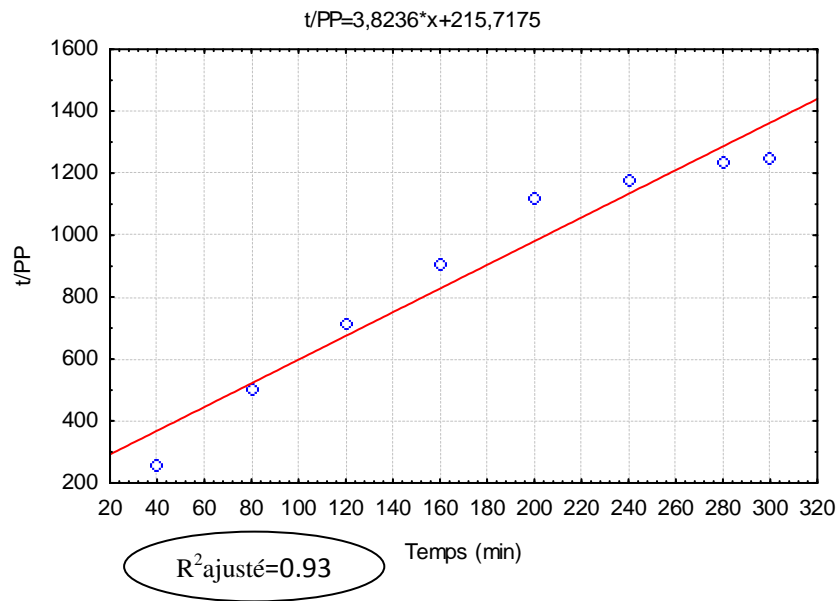
suite, le transport de l'eau du cœur du produit vers l'extérieur. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par **Eren İsmail et Figen Kayak-Erstein(2006)** pour la variété de pomme de terre *Granola*.

## **I.2. Modélisation de la cinétique de la déshydratation osmotique selon le modèle mathématique proposé par AZUARA et al. (1998)**

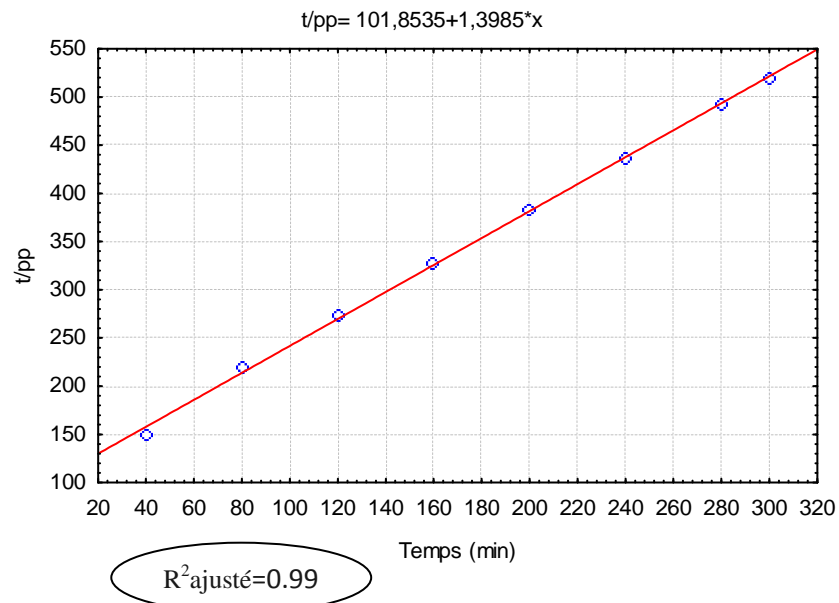
Les valeurs de  $t/pp$  sont présentées graphiquement en fonction du temps (figures 20 à 24). On observe une linéarité du modèle **d'Azuara et al. (1998)**. Ce modèle est caractérisé par l'équation :  $t/pp = 2,446x + 77,0175$ , avec un  $R^2$  ajusté=0,99 qui confirme sa validité pour étudier le transfert de masse et la prédiction du taux de la perte en eau et le gain en soluté au cours de la déshydratation osmotique des pommes de terre (figure 20).



**Figure n°20:** Variation de  $t/PP$  en fonction du temps des cubes de pomme de terre déshydratés à 20°C et à une concentration en sel de 10% pendant 300min.

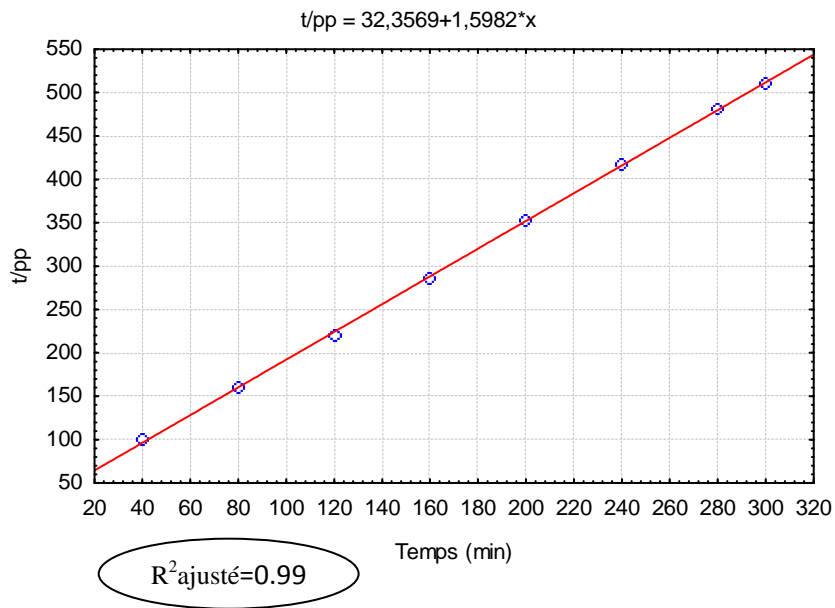


**Figure n°21:** Variation de t/PP en fonction du temps des cubes de pomme de terre déshydratés à 60°C et à une concentration en sel de 10% pendant 300min.

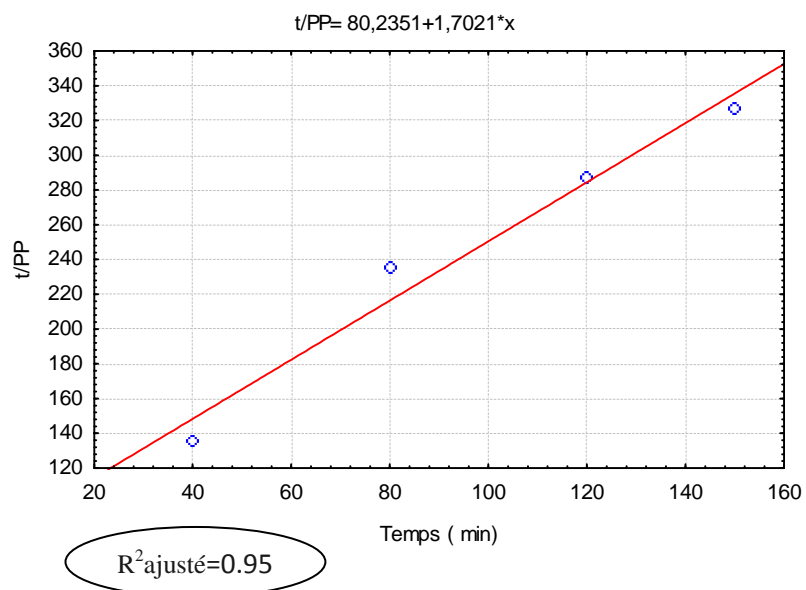


**Figure n° 22:** Variation de t/PP en fonction du temps des cubes de pomme de terre déshydratés à 20°C et à une concentration en saccharose de 40°Brix pendant 300min.





**Figure n° 23:** Variation de t/PP en fonction du temps des cubes de pomme de terre déshydratés à 60°C et à une concentration en saccharose de 40°Brix pendant 300min.



**Figure n° 24:** Variation de t/PP en fonction du temps des rondelles de pomme de terre déshydratées à 20°C et à une concentration en saccharose de 60°Brix pendant 150min

### **I.3. Optimisation de la déshydratation osmotique des cubes de pomme de terre dans une solution saline concentrée par la Méthodologie de Surface de Réponse**

La méthodologie de surface de réponse (MSR) a été utilisée pour estimer les principaux effets des variables indépendantes du processus de la déshydratation osmotique (temps, concentration en sel, température) sur la perte en eau, la perte en poids et le gain de solide des cubes de pomme de terre.

#### **I.3.1. L'analyse statistique**

Le Design Expert 8.0.6 a été utilisé pour concevoir le plan expérimental. La conception comprend 17 expériences. Ce logiciel permet d'optimiser le processus de la déshydratation osmotique de la pomme de terre en déterminant la meilleure combinaison entre les variables. Les niveaux des différentes variables du processus de la déshydratation osmotique de la pomme de terre dans une solution saline (temps, concentration, température) sont présentés dans le Tableau n°6.

**Tableau n°6 :** Les niveaux des différentes variables du processus de la déshydratation osmotique des cubes de pomme de terre dans une solution saline.

<b>Variables indépendantes</b>	<b>Niveaux</b>		
	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>+1</b>
<b>Température (°C)</b>	20	40	60
<b>Temps (min)</b>	80	150	300
<b>Concentration en sel (%)</b>	5	10	15

Les conditions des 17 expériences et les valeurs des réponses ( PP%, PE% et GS%) sont présentées sur le tableau n° 7 .

**Tableau n°7:** Les conditions expérimentales et les réponses obtenues par la MSR

(cubes de pomme de terre salés)

Essais	Température	Temps	Concentration en sel	PP%	PE%	GS%
1	0	0	0	32.9	34.09	1.65
2	0	0	0	32.9	34.09	1.65
3	+1	-1	0	16	16.1	0.75
4	-1	0	+1	29	44.08	12.24
5	-1	+1	0	37.5	36.33	0.58
6	0	-1	+1	26.3	34.47	8.67
7	-1	0	-1	35.9	44.31	9.75
8	-1	-1	0	28.9	29.14	1.44
9	+1	+1	0	24	24.59	1.77
10	0	0	0	32.9	34.09	1.65
11	0	-1	-1	30.9	34.44	4.68
12	0	+1	+1	32.7	40	8.84
13	+1	0	-1	23.6	31.53	8.54
14	0	+1	-1	40	45	6.3
15	0	0	0	32.9	34.09	1.65
16	+1	0	+1	19.5	37.98	18.99
17	0	0	0	32.9	34.09	1.65

### **I.3.2. Analyse de la variance (ANOVA) de l'effet des différents paramètres sur les réponses**

Le tableau n°8 montre l'analyse de la variance pour l'ajustement des modèles polynomiaux des données expérimentales ainsi que la signification statistique des effets principaux des variables du processus ( termes linéaires, termes quadratiques, termes interactifs).

#### **I.3.2.1 Ajustement du modèle**

Les expériences ont été réalisées en utilisant un plan composite central présenté sur le Tableau n°7. Les valeurs 0,97 ,6.67 et 2,88 de F du manque d'ajustement (Lack fit) permettent de conclure que le manque d'ajustement n'est pas significatif, cela veut dire que l'écart entre le modèle théorique et le modèle expérimental est négligeable. Le test de F-

Fischer avec une faible valeur de probabilité  $P_{\text{modèle}} > F = 0.0001$ ) démontre une signification élevée du modèle de régression. La qualité de l'ajustement du modèle est vérifiée par le coefficient de régression ( $R^2$ ). Les coefficients de régression  $R^2$  obtenus respectivement pour la perte en poids, la perte en eau et le gain de solide sont 0.9955, 0.9755, 0.9798. Cela implique que plus de 97% des données expérimentales sont compatibles avec les données prédites par le modèle et que moins de 3% des variations totales ne sont pas expliquées par le modèle (Tableaux n°8, 9 et 10). La valeur de  $R^2$  est comprise entre 0 et 1, et une valeur supérieure à 0,75 confirme la fiabilité du modèle. La valeur de  $R^2$  ajusté corrige la valeur de  $R^2$  en fonction de la taille de l'échantillon et le nombre de termes dans le modèle. La valeur de  $R^2$  ajusté (0,9441 pour PE ; 0,9538 pour GS et 0,9897 pour PP) est assez élevée pour justifier la grande signification du modèle. S'il y a de nombreux termes dans le modèle et la taille de l'échantillon n'est pas très grande, le  $R^2$  ajusté peut être sensiblement inférieure à la  $R^2$ . Ici, dans ce cas, la valeur de  $R^2$  ajusté est moindre que le  $R^2$ . La précision adéquate mesure le rapport signal sur bruit. Un rapport supérieur à 4 est souhaitable. Dans ce travail, le rapport se trouve à être  $> 20$ , ce qui indique un signal adéquat.

L'expression mathématique de la relation entre la réponse (PP, PE, GS) et les variables du processus de la déshydratation osmotique est indiquée dans les équations suivantes:

$$\text{Equation (1): PP} = +32.90 - 6.03 * A + 4.0 * B - 2.86 * C - 0.15 * A * B + 0.70 * A * C - 0.68 * B * C - 5.89 * A^2 - 0.41 * B^2 - 0.012 * C^2$$

$$\text{Equation (2): PE} = + 34.09 - 5.46 * A + 3.97 * B + 0.16 * C + 0.32 * A * B + 1.67 * A * C - 1.26 * B * C - 3.28 * A^2 - 4.27 * B^2 + 8.66 * C^2$$

$$\text{Equation (3): GS} = +1.65 + 0.75 * A + 0.24 * B + 2.43 * C + 0.47 * A * B + 1.99 * A * C - 0.36 * B * C + 2.37 * A^2 - 2.89 * B^2 + 8.36 * C^2$$

Où PE, PP et GS sont respectivement la perte en eau (%), la perte en poids (%) et le gain en solide (%) et A, B, C, sont respectivement les valeurs codées des variables testées suivantes : température (°C), temps (min), concentration de la solution en NaCl (%p/p). Les résultats de régressions linéaires multiples effectuées pour le modèle des surfaces de réponse de second degré sont données par les Tableaux n° 8, 9 et 10. La signification de chaque coefficient est déterminée par le test –Student et les valeurs de P énumérées sur les Tableaux n° 8, 9 et 10. Plus l'amplitude de la valeur de F est élevée et celle de P est faible, plus le coefficient correspondant est significatif. Les valeurs de "Prob > F" inférieures à

0.0500 indiquent que les facteurs du modèle sont significatifs. Les valeurs supérieures à 0.10 indiquent que les facteurs du modèle ne sont pas significatifs.

Le signe et l'amplitude des coefficients précisent les effets des variables sur la réponse. Le signe négatif du coefficient signifie que la réponse diminue lorsque la variable augmente, tandis que le signe positif indique une augmentation de la réponse. **Montgomery (2004)** a rapporté que pour l'interaction positive le niveau de l'une des variables interactives pourrait augmenter pendant que l'autre diminue afin d'aboutir à une valeur constante de la réponse.

Les effets quadratiques indiquent que dans un premier temps, la valeur attribuée à la variable de réponse augmente de manière significative (jusqu'à un point maximal) à mesure que la variable augmente. Dans un deuxième temps, après un point de réponse maximale, l'effet de l'augmentation de la variable devient négatif. Pour visualiser les effets combinés des variables sur les réponses, des surfaces de réponses et des tracés de contour ont été réalisées en fonction de deux variables indépendantes tout en gardant la troisième comme valeur centrale. La forme elliptique de la courbe des tracés de contour indique la bonne interaction des deux variables et la forme circulaire n'indique aucune interaction entre les variables.

### **I.3.2.2 La perte en poids**

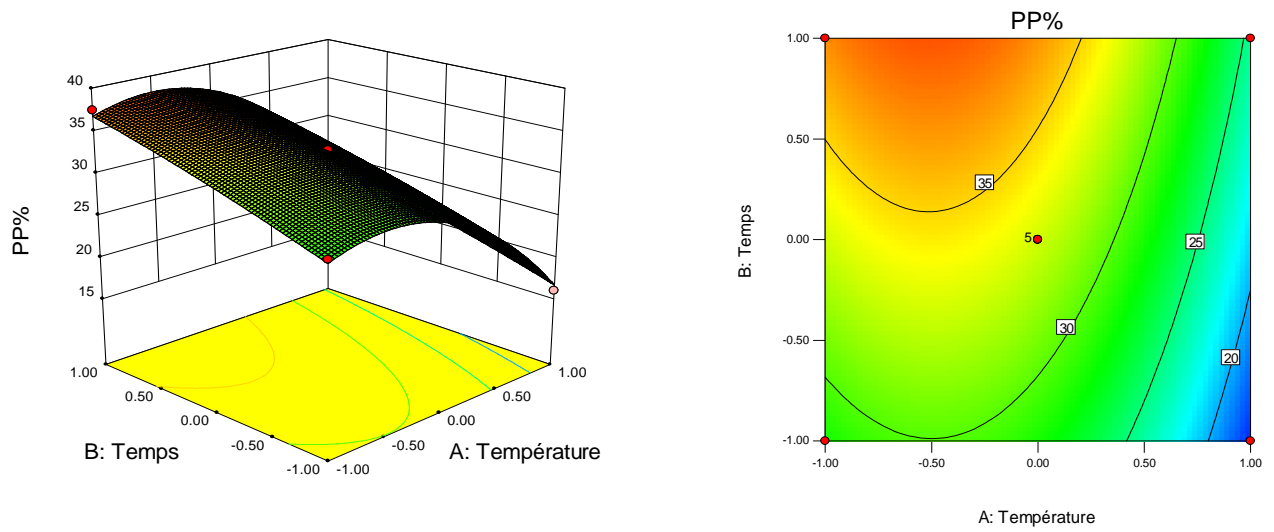
Les valeurs indiquées dans le tableau n° 7 montrent un maximum de la PP de 40% observé lors de la déshydratation osmotique des cubes de pomme de terre conduite à 40°C, 5% de sel pendant une durée de traitement de 300 min, alors que le minimum est de 16%, observé à 60°C, 10% de sel, pour un temps d'immersion de 80min.

Les valeurs-p indiquent que les termes A, B, C, A<sup>2</sup> ont des effets significatifs sur la perte en poids au cours de la déshydratation osmotique, contrairement aux termes AB, AC, BC, B<sup>2</sup>, C<sup>2</sup>, qui ont un effet non significatifs. Les coefficients d'estimation indiquent l'influence positive du temps et l'influence négative de la température et de la concentration en sel de la solution osmotique sur la perte en poids. Ces résultats montrent que la perte en poids augmente avec l'augmentation de la durée du processus et diminue avec l'augmentation de la température et de la concentration en sel de la solution osmotique.

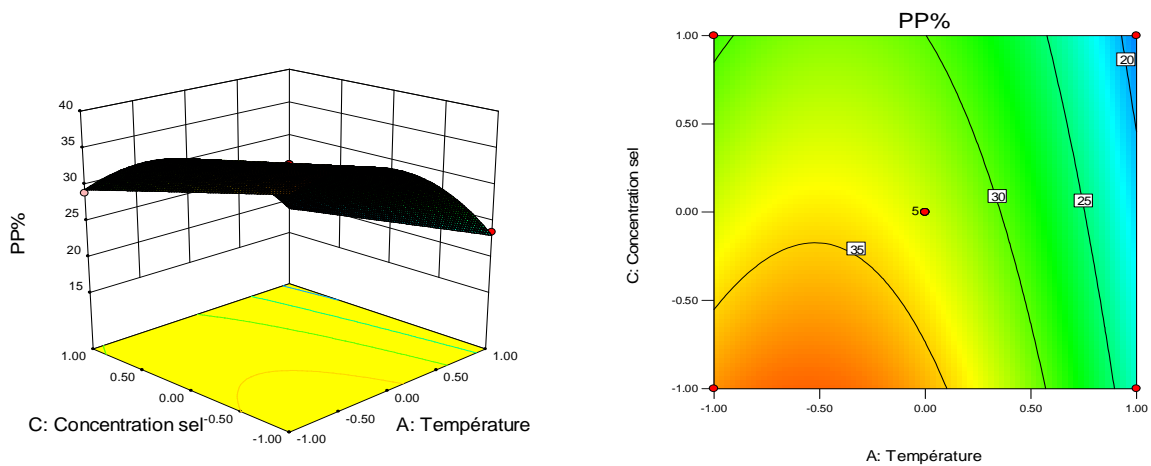
**Tableau n°8:** Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques  
Modèle pour la perte en poids , de la pomme de terre lors de la déshydratation osmotique.

Source	Perte en poids			
	Coefficient d'estimation	Moyenne des Carrés	F Valeur	p-valeur Prob > F
<b>Model</b>	32.90	70.82	171.08	< 0.0001
<b>A-Température</b>	-6.03	290.41	701.58	< 0.0001
<b>B-Temps</b>	4.01	128.80	311.17	< 0.0001
<b>C-Concentration en sel</b>	-2.86	65.55	158.36	< 0.0001
<b>AB</b>	-0.15	0.090	0.22	0.6552
<b>AC</b>	0.70	1.96	4.74	0.0660
<b>BC</b>	-0.68	1.82	4.40	0.0741
<b>A<sup>2</sup></b>	-5.89	145.95	352.59	< 0.0001
<b>B<sup>2</sup></b>	-0.41	0.72	1.73	0.2298
<b>C<sup>2</sup></b>	-0.012	6.579E-004	1.589E-003	0.9693
<b>Résiduel</b>		0.41		
<b>Manque d'ajust.</b>		0.97		
<b>R-deux</b>		0.9955		
<b>R-deux ajusté</b>		0.9897		
<b>R-deux prédit</b>		0.9276		

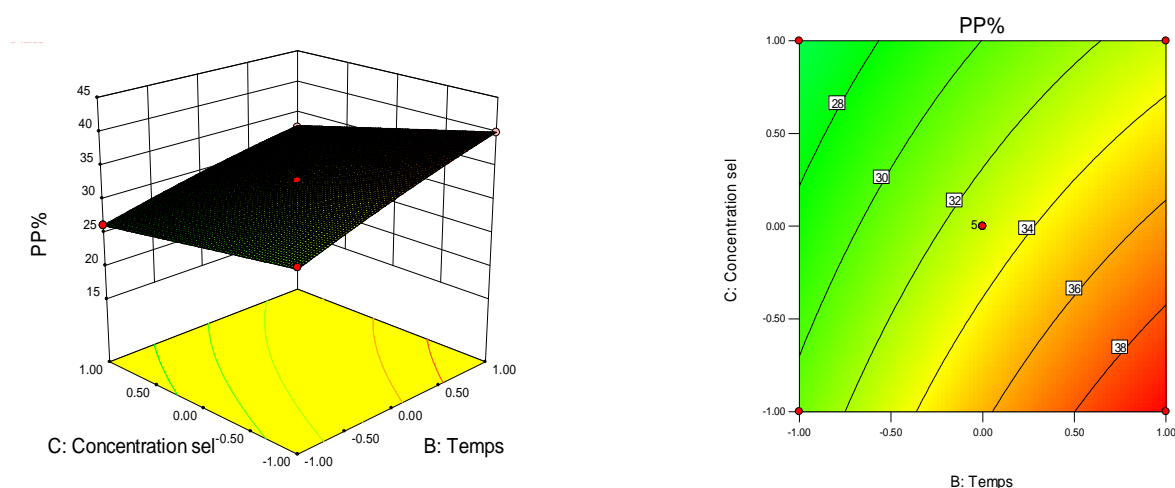
Les termes quadratiques de la température , du temps et de la concentration en sel ont un effet négatif sur la perte en poids. En outre seulement l'interaction A-C (température-concentration en sel) présente un effet positif alors que les interactions A-B( Température-temps), B-C(temps- concentration en sel) ont un effet négatif sur la perte en poids. Ces résultats sont clairement illustrés dans les figures n° (25, 26 , 27).



**Figure n° 25:** Surface de réponce et tracé de contour de l'effet du temps et de la température sur la PP des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution saline.



**Figure n°26:** Surface de réponce et tracé de contour de l'effet de la concentration en sel et de la température sur la PP des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution saline.



**Figure n° 27 :** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la concentration en sel et du temps sur la PP des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution saline .

### I.3.2.3. Perte en eau

Le maximum de la perte en eau est de 45% observé à une déshydratation osmotique conduite à 40°C, une concentration en sel de 5% et pendant une durée de traitement de 300min alors que le minimum est de 16.1% observé à 60°C, 10% de sel , pour un temps d'immersion de 80 min (Tableau n° 7).

Les valeurs-p indiquent que les termes du modèle A, B, A<sup>2</sup>, B<sup>2</sup>, C<sup>2</sup> ont des effets significatifs sur la perte en eau contrairement aux termes C, A-B, A-C, B-C qui présentent des effets non significatifs.

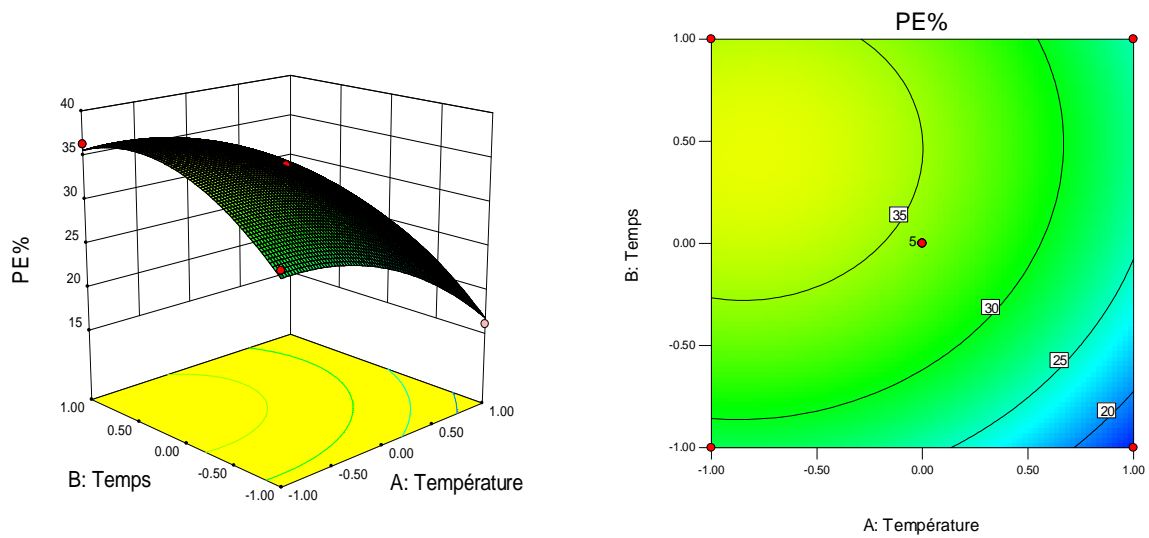
Les coefficients d'estimation indiquent l'influence positive sur la perte en eau de la durée de déshydratation osmotique suivie de la concentration en sel et une influence négative de la température. Cela veut dire que la perte en eau augmente avec l'augmentation du temps et de la concentration en sel de la solution osmotique et diminue avec l'augmentation de la température. les interactions A-B (température- temps), A-C( température-concentration en sel) ont un effet positif sur la PE et l'interaction B-C a un effet négatif. Le terme quadratique de la température A<sup>2</sup> et du temps B<sup>2</sup> présente un effet négatif sur la perte en eau contrairement au terme quadratique de la concentration en sel. ceci est clairement illustré dans les figures (28, 29 et 30).



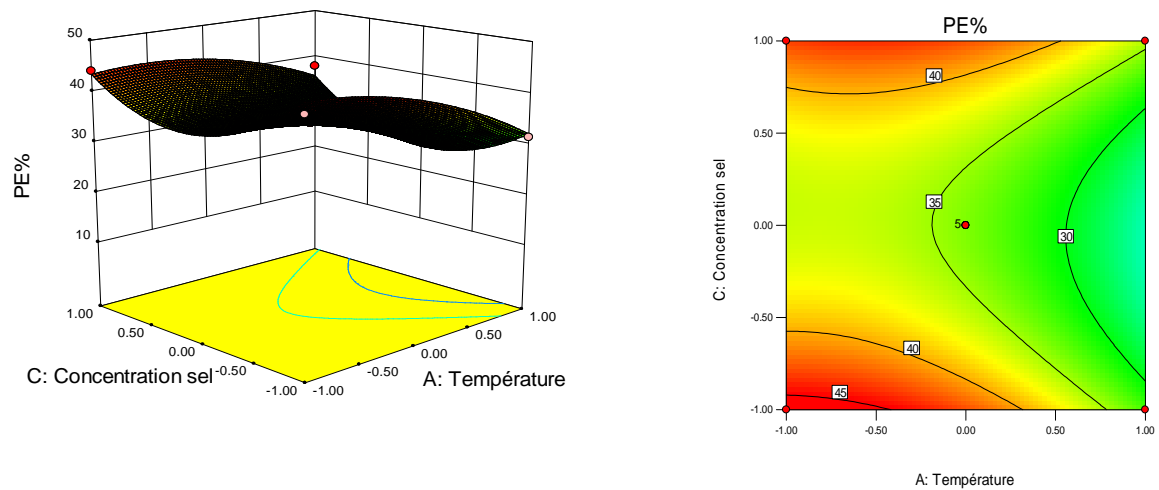
**Tableau n°9 :** Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques  
Modèle pour la perte en eau

Source	Perte en eau			
	Coefficient d'estimation	Moyenne des Carrés	F Valeur	p-valeur Prob > F
<b>Model</b>	34.09	88.77	31.03	< 0.0001
<b>A-Température</b>	-5.46	238.27	83.29	< 0.0001
<b>B-Temps</b>	3.97	126.17	44.10	0.0003
<b>C-Concentration en sel</b>	0.16	0.20	0.068	0.8014
<b>AB</b>	0.32	0.42	0.15	0.7122
<b>AC</b>	1.67	11.16	3.90	0.0889
<b>BC</b>	-1.26	6.33	2.21	0.1806
<b>A<sup>2</sup></b>	-3.28	45.20	15.80	0.0054
<b>B<sup>2</sup></b>	-4.27	76.91	26.88	0.0013
<b>C<sup>2</sup></b>	8.66	315.86	110.42	< 0.0001
<b>Résiduel</b>		2.86		
<b>Manque d'ajust.</b>		6.67		
<b>R-deux</b>		0.9755		
<b>R-deux ajusté</b>		0.9441		
<b>R-deux prédit</b>		0.9288		

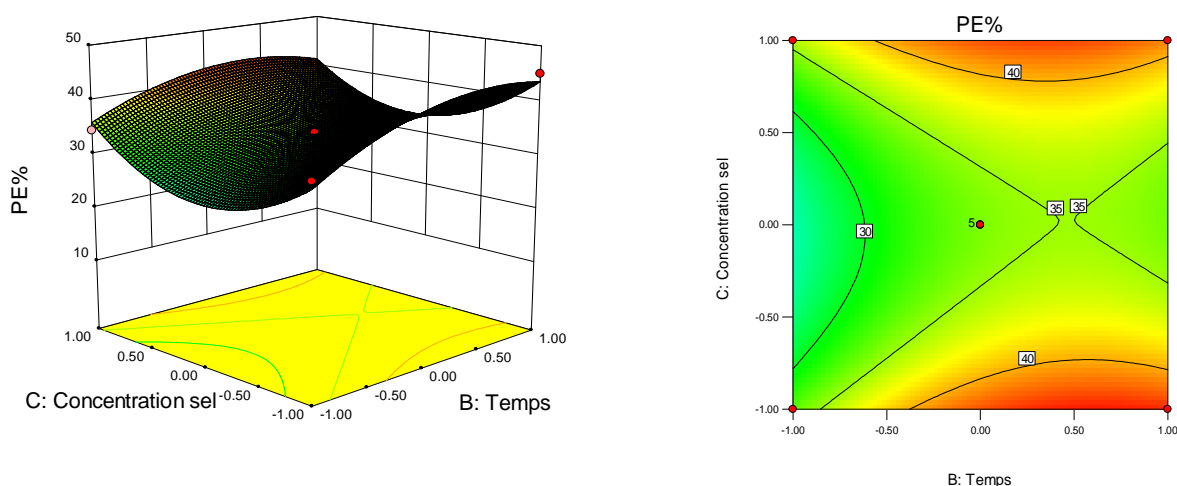
Au début du traitement, en raison de la force motrice osmotique élevée entre la solution concentrée et les échantillons de pomme de terre, le taux d'enlèvement de l'eau est relativement important (Figures n° 28 et 30). Ce phénomène d'élimination rapide de l'eau dans les premiers stades de la déshydratation osmotique a été rapporté par plusieurs chercheurs (Ertekin et Çakaloz, 1996 ; Genia- Soto et al., 2001) .



**Figure n° 28:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la température sur la PE des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution saline.



**Figure n° 29:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la concentration en sel et de la température sur la PE des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution saline.



**Figure n° 30:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la concentration en sel et du temps sur la PE des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution saline.

### **I.3.2.4. Gain de solide**

Pour la déshydratation osmotique des cubes de pomme de terre réalisée à 60°C, 15% de sel et pendant 150min, le maximum de gain de solide obtenu est de 18,99% alors que le minimum observé est de 0,75% à 60°C, 10% de sel, durant 80min (Tableau n° 7).

Les valeurs-p indiquent que tous les termes quadratiques  $A^2$ ,  $B^2$ ,  $C^2$  ont un effet significatif sur le gain de solide. En termes linéaires, seulement  $C$  a un effet significatif, en termes interactifs, seulement  $AC$  s'avère significatif sur le gain de solide au cours de la déshydratation osmotique .

Selon les coefficients d'estimation, tous les termes linéaires des variables montrent une influence positive sur le gain de solide. Ceci entraîne une augmentation du GS avec l'augmentation de la concentration en sel de la solution osmotique suivie de la température puis de la durée du processus de déshydratation osmotique .Les termes quadratiques de la température  $A^2$  et de la concentration en sel  $C^2$  présente un effet positif sur le gain de solide contrairement au terme quadratique de la durée du processus qui a un effet négatif. Les termes interactifs  $A-B$  (température- temps) et  $A-C$  ( température- concentration en sel) montrent un effet positif sur le gain de solide alors que l'interaction entre  $B-C$  ( temps- concentration en sel) a un effet négatif (Figures n° 31, 32 et 33).

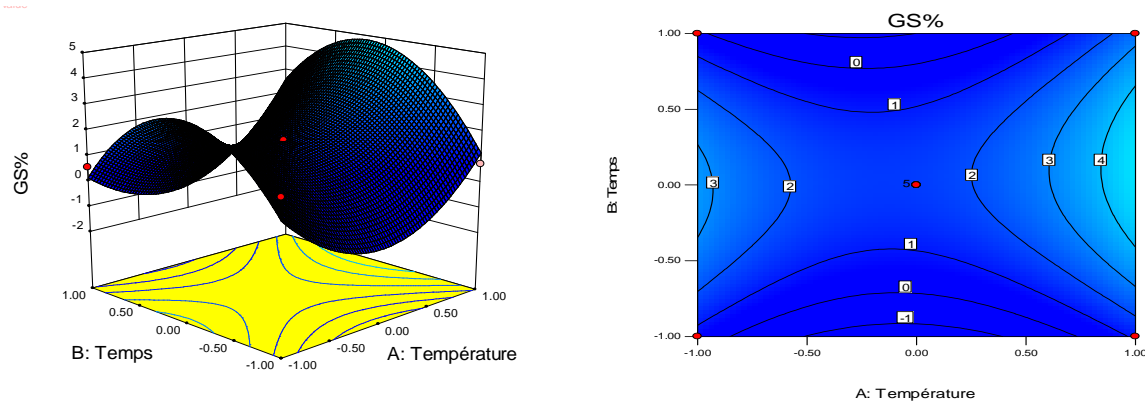
Pour une courte durée de traitement , l'augmentation de la température augmente la perte en eau plus rapidement que le gain en solide , ce phénomène est attribué à la différence de

diffusion de l'eau et des solutés liée à la masse molaire (Lazarides et al., 1995 ; Torregiani, 1993). Figures (28 et 31).

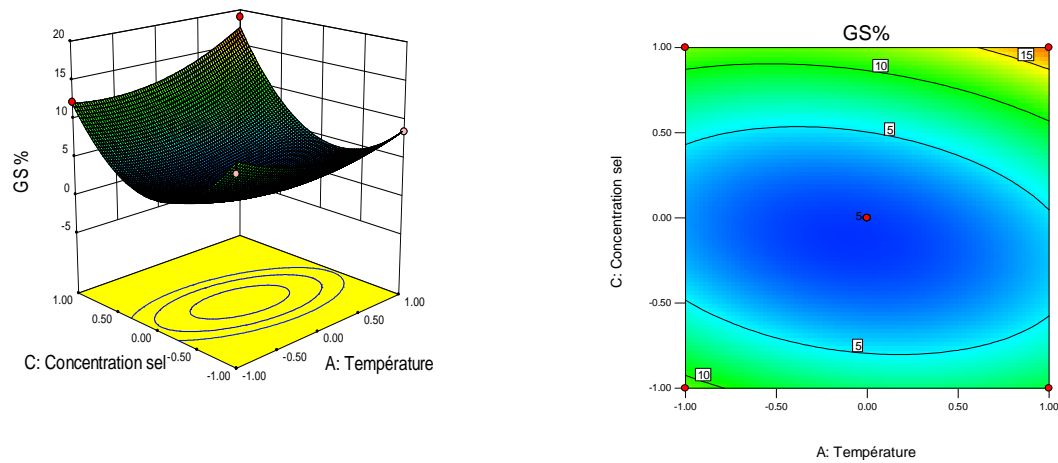
**Tableau n°10 :** Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques

Modèle pour le gain de solide

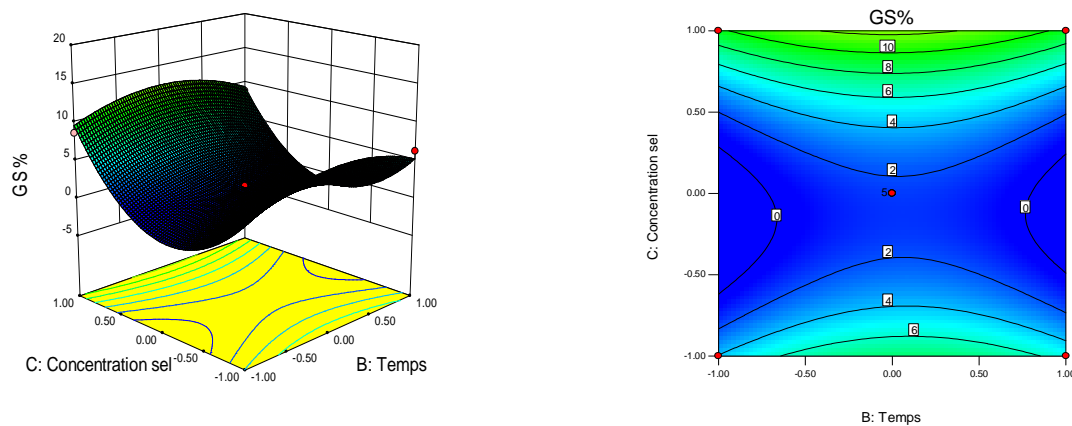
Source	Gain de solide			
	Coefficient d'estimation	Moyenne des Carrés	F Valeur	p-valeur Prob > F
<b>Model</b>	1.65	46.60	37.74	< 0.0001
<b>A-Température</b>	0.75	4.56	3.69	0.0961
<b>B-Temps</b>	0.24	0.48	0.38	0.5546
<b>C-Concentration en sel</b>	2.43	47.39	38.38	0.0004
<b>AB</b>	0.47	0.88	0.72	0.4256
<b>AC</b>	1.99	15.84	12.83	0.0090
<b>BC</b>	-0.36	0.53	0.43	0.5349
<b>A<sup>2</sup></b>	2.37	23.68	19.17	0.0032
<b>B<sup>2</sup></b>	-2.89	35.08	28.41	0.0011
<b>C<sup>2</sup></b>	8.36	294.18	238.25	< 0.0001
<b>Résiduel</b>		1.23		
<b>Manque d'ajust.</b>		2.88		
<b>R-deux</b>		0.9798		
<b>R-deux ajusté</b>		0.9538		
<b>R-deux prédit</b>		0.9269		



**Figure n° 31:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la température sur le GS des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution saline.



**Figure n° 32:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la température et la concentration en sel sur le GS des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution saline.



**Figure n° 33:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la concentration en sel sur le GS des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution saline.

### I.3.3. Conditions optimales de la déshydratation osmotique des cubes de pomme de terre dans une solution saline

Les conditions optimales pour la déshydratation osmotique des pommes de terre ont été déterminées afin d'obtenir le maximum de perte en eau, en poids et le minimum de gain en solide. Dans cette étude, les valeurs optimales obtenues par la substitution des codes respectifs des variables dans le cas de la déshydratation osmotique de la pomme de terre dans une solution saline sont : une température de 40°C, une concentration en sel de 5% et pendant une durée de 300 min. À ce point, les valeurs de la perte en eau, la perte en poids et le gain en solide obtenus respectivement sont de : 45%, 40% et 6.3%.

## I.4 Optimisation de la déshydratation osmotique des cubes de pomme de terre dans une solution de saccharose concentrée par la Méthodologie de Surface de Réponse

### I.4.1. L'analyse statistique

**Tableau n°11 :** Les niveaux des différentes variables du processus de la déshydratation osmotique des cubes de pomme de terre dans une solution de saccharose.

Variables indépendantes	Niveaux		
	-1	0	+1
Température (°C)	20	40	60
Temps (min)	80	150	300
Concentration en saccharose (°Brix)	40	50	60

**Tableau °12 :** Les conditions expérimentales et les réponses obtenues par la MSR

Essais	Température	Temps	Concentration en saccharose	PP%	GS%	PE%
1	0	0	0	46.5	2	49
2	0	0	0	46.5	2	49
3	+1	-1	0	41.8	9	50.6
4	-1	0	+1	51.3	3.3	52
5	-1	+1	0	55.9	1.5	58
6	0	-1	+1	43.6	2.5	48.89
7	-1	0	-1	40	0.79	40.4
8	-1	-1	0	36	0.47	37
9	+1	+1	0	57.5	10.5	65
10	0	0	0	46.5	2	49
11	0	-1	-1	36.8	6.37	42
12	0	+1	+1	60	3.5	63.28
13	+1	0	-1	45	11.2	54
14	0	+1	-1	52.1	9	60
15	0	0	0	46.5	2	49
16	+1	0	+1	59	6.4	65.4
17	0	0	0	46.5	2	49

## **I.4.2. Analyse de la variance (ANOVA) de l'effet des différents paramètres sur les réponses**

### **I.4.2.1. Ajustement du modèle**

Le test F de Fisher avec une valeur très faible de probabilité ( $p < 0.0005$ ) démontre une très grande signification du modèle avec un manque d'ajustement non significatif (Tableaux n° 13, 14 et 15). les coefficients de regression  $R^2$  obtenus respectivement pour la perte en poids, la perte en eau et le gain de solide sont 0.9773, 0.9755, 0.9588. Cela implique que plus de 95% des données expérimentales sont compatibles avec les données prédites par le modèle et que moins de 5% des variations totales ne sont pas expliquées par le modèle .

L'expression mathématique de la relation entre la réponse (PP, PE, GS) et les variables du processus de la déshydratation osmotique A, B, C est indiquée dans les équations suivantes:

$$\text{Equation( 1')}: PP = +46.50 + 2.51 * A + 8.41 * B + 5.00 * C - 1.05 * A * B + 0.68 * A * C + 0.28 * B * C + 1.00 * A^2 + 0.30 * B^2 + 1.32 * C^2$$

$$\text{Equation( 2')}: PE = + 49.00 + 5.95 * A + 8.47 * B + 4.15 * C - 1.65 * A * B - 0.050 * A * C - 0.90 * B * C + 1.53 * A^2 + 2.12 * B^2 + 2.42 * C^2$$

$$\text{Equation( 3')}: GS = + 2.00 + 3.88 * A + 0.77 * B - 1.46 * C + 0.12 * A * B - 1.83 * A * C - 0.41 * B * C + 1.72 * A^2 + 1.64 * B^2 + 1.70 * C^2$$

### **I.4.2.2. La perte en poids**

Le maximum de la perte en poids 60% est obtenu suite à une déshydratation osmotique conduite à 40°C, une concentration en saccharose de 60°Brix et pendant une durée d'immersion de 300 min, alors qu'un minimum de 36% est obtenu pour une déshydratation réalisée à 20°C, une concentration en saccharose de 40°Brix pendant 80min (Tableau n°12).

Les termes linéaires de la température, de la concentration en saccharose et de la durée de la déshydratation osmotique (A, B, C) ont un effet significatifs sur la perte en poids, tandis

## Etude expérimentale

### Résultats et discussion

que les termes quadratiques et interactifs ( $A^2$ ,  $B^2$ ,  $C^2$ , A-B, A-C, B-C) ont un effet non significatif (tableau n° 13).

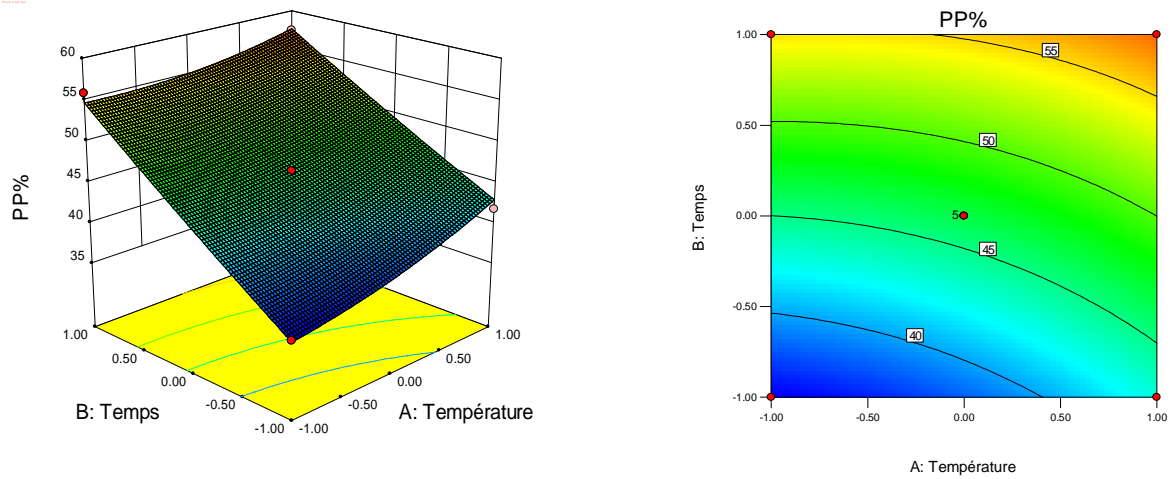
**Tableau n°13 :** Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques

Modèle pour la perte en poids

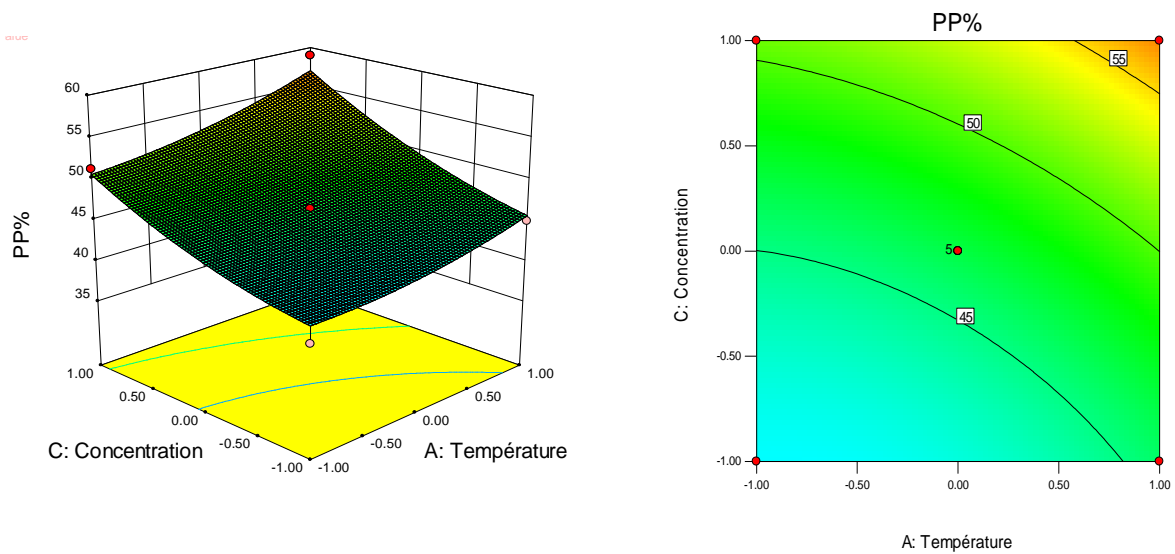
Source	Perte en poids			
	Coefficient d'estimation	Moyenne des Carrés	F Valeur	p-valeur Prob > F
<b>Model</b>	46.50	92.91	33.43	< 0.0001
<b>A-Température</b>	2.51	50.50	18.17	0.0037
<b>B-Temps</b>	8.41	566.16	203.68	< 0.0001
<b>C-Concentration en saccharose</b>	5.00	200.00	71.95	< 0.0001
<b>AB</b>	-1.05	4.41	1.59	0.2482
<b>AC</b>	0.68	1.82	0.66	0.4447
<b>BC</b>	0.28	0.30	0.11	0.7511
<b>A<sup>2</sup></b>	1.00	4.21	1.51	0.2582
<b>B<sup>2</sup></b>	0.30	0.38	0.14	0.7229
<b>C<sup>2</sup></b>	1.32E-004	7.39	2.66	0.1470
<b>Résiduel</b>		2.78		
<b>Manque d'ajust.</b>		6.49		
<b>R-deux</b>		0.9773		
<b>R-deux ajusté</b>		0.9480		
<b>R-deux prédit</b>		0.9362		

Les coefficients d'estimation indiquent l'influence positive de la durée de la déshydratation osmotique suivie de la température puis de la concentration en saccharose de la solution d'osmose sur la perte en poids. Ces résultats montrent que la perte en poids augmente avec l'augmentation de la température, de la concentration en saccharose de la solution osmotique et de la durée du processus. Les interactions A-C, B-C présente un effet positif sur la perte en poids contrairement à l'interaction A-B qui a un effet négatif. Tous les termes quadratiques  $A^2$ ,  $B^2$ ,  $C^2$  ont un effet négatif sur la perte en poids (figures 34, 35 et 36).

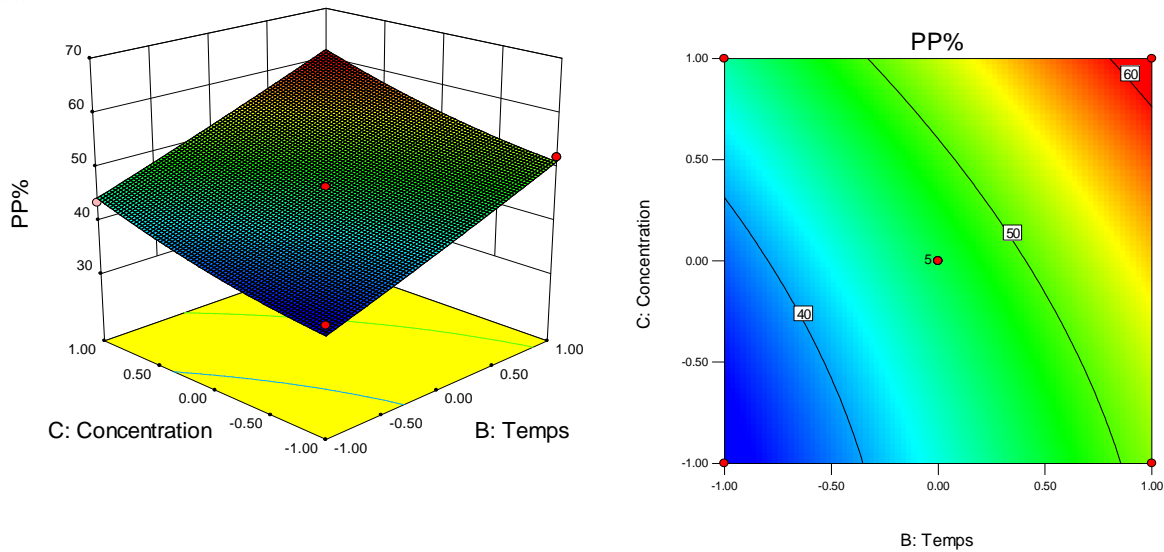




**Figure n° 34:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la température sur la PP des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution de saccharose.



**Figure n° 35:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la température et de la concentration en saccharose sur la PP des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution de saccharose.



**Figure n° 36:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la concentration en saccharose sur la PP des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution de saccharose.

### I.4.2.3. La perte en eau

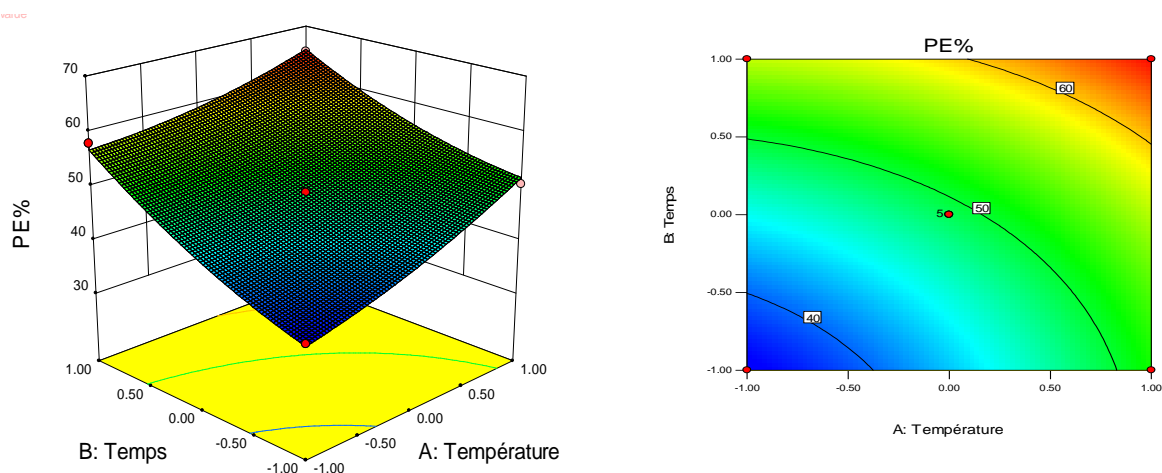
Le maximum de la perte en eau 65,4% est obtenu suite à une déshydratation osmotique conduite à 60°C, une concentration en saccharose de 60°Brix, une durée du processus de 150 min alors que le minimum obtenu est de 37% pour une déshydratation osmotique réalisée à 20°C, 40°Brix pendant 80 min (Tableau n°12).

L'analyse de la variance montre que les termes A, B, C,  $C^2$  ont un effet significatif sur la perte en eau contrairement aux termes A-B, A-C, B-C,  $A^2$ ,  $B^2$  qui ont un effet non significatif (Tableau n°14). Les coefficients d'estimation montrent l'influence positive des termes linéaires (B, A, C) sur la perte en eau. Cela veut dire que la PE augmente avec l'augmentation de la durée du processus de déshydratation, de la température et de la concentration en saccharose de la solution osmotique. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par **Manivannan P. et Rajasimman M. (2009)** lors de la déshydratation osmotique des radis dans une solution de saccharose. Les termes interactifs A-B, A-C, B-C présentent un effet négatif sur la perte en eau. En outre tous les termes quadratiques  $A^2$ ,  $B^2$ ,  $C^2$  ont un effet positif sur la PE (figures 37 à 39).

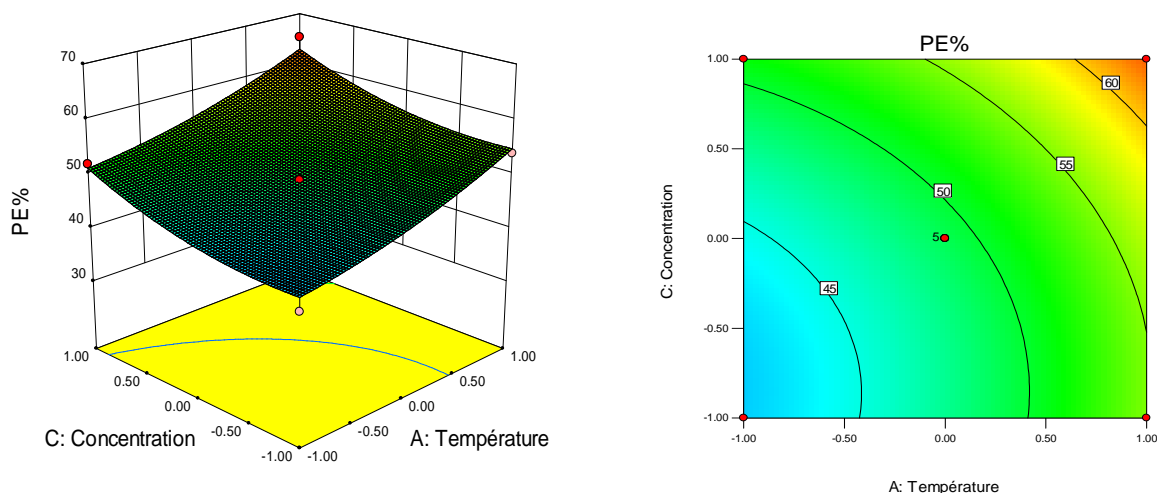
**Tableau n°14 :** Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques

Modèle pour la perte en eau

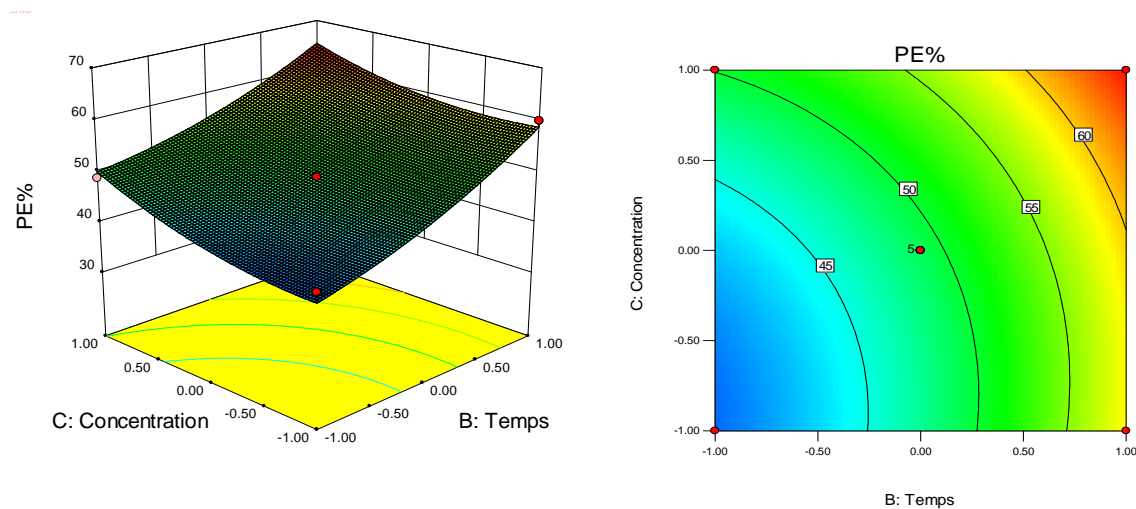
Source	Perte en eau			
	Coefficient d'estimation	Moyenne des Carrés	F Valeur	p-valeur Prob > F
<b>Model</b>	49.00	118.76	30.99	< 0.0001
<b>A-Température</b>	5.95	283.22	73.90	< 0.0001
<b>B-Temps</b>	8.47	574.44	149.88	< 0.0001
<b>C-Concentration en saccharose</b>	4.15	137.53	35.88	0.0005
<b>AB</b>	-1.65	10.89	2.84	0.1357
<b>AC</b>	-0.050	1.000E-002	2.609E-003	0.9607
<b>BC</b>	-0.90	3.26	0.85	0.3872
<b>A<sup>2</sup></b>	1.53	9.84	2.57	0.1531
<b>B<sup>2</sup></b>	2.12	18.95	4.94	0.0616
<b>C<sup>2</sup></b>	2.42	24.68	6.44	0.0388
<b>Residuel</b>		3.83		
<b>Manque d'ajust.</b>		8.94		
<b>R-deux</b>		0.9755		
<b>R-deux ajusté</b>		0.9440		
<b>R-deux prédit</b>		0.9082		



**Figure n° 37:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la température sur la PE des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution de saccharose.



**Figure n° 38:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la température et de la concentration en saccharose sur la PE des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution de saccharose.



**Figure n° 39:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la concentration en saccharose sur la PE des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution de saccharose.

#### I.4.2.4. Le gain de solide

Un maximum de gain de solide de 11.2% est obtenu suite à une déshydratation des cubes de pomme de terre à 60°C, 20°Brix pendant 150 min alors que le minimum est de 0.47% obtenu à 20°C, 40°Brix pour une durée d'immersion de 80 min (Tableau n°12).

## *Etude expérimentale*

### *Résultats et discussion*

Les termes A, C, A-C, A<sup>2</sup>, B<sup>2</sup>, C<sup>2</sup> présentent un effet significatif, contrairement aux termes B, A-B, B-C qui ont un effet non significatif (Tableau n°15),.

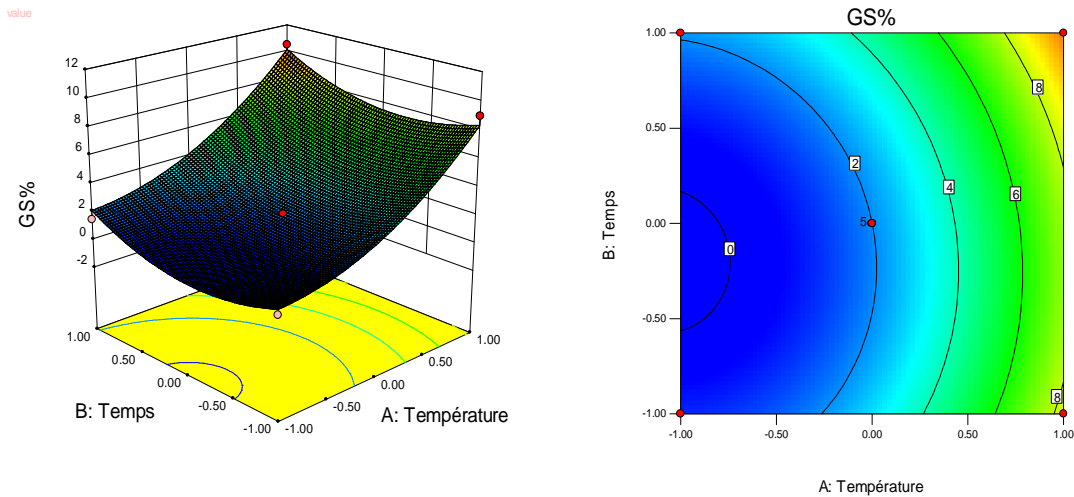
Selon les coefficients d'estimation, on note une influence positive sur le gain de solide du temps et de la température et une influence négative de la concentration en saccharose. Cela veut dire que le gain de solide augmente avec l'augmentation de la température et de la durée du processus de déshydratation osmotique et diminue avec l'augmentation de la concentration en saccharose (Figures 40 à 42). Ce phénomène de diminution du GS avec l'augmentation de la concentration peut être attribué à une augmentation de la viscosité de la solution osmotique ce qui rend la pénétration du soluté plus difficile. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par **Singh et al. (2007)** dans l'étude de la déshydratation osmotique des carottes.

**Tableau n°15 :** Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques

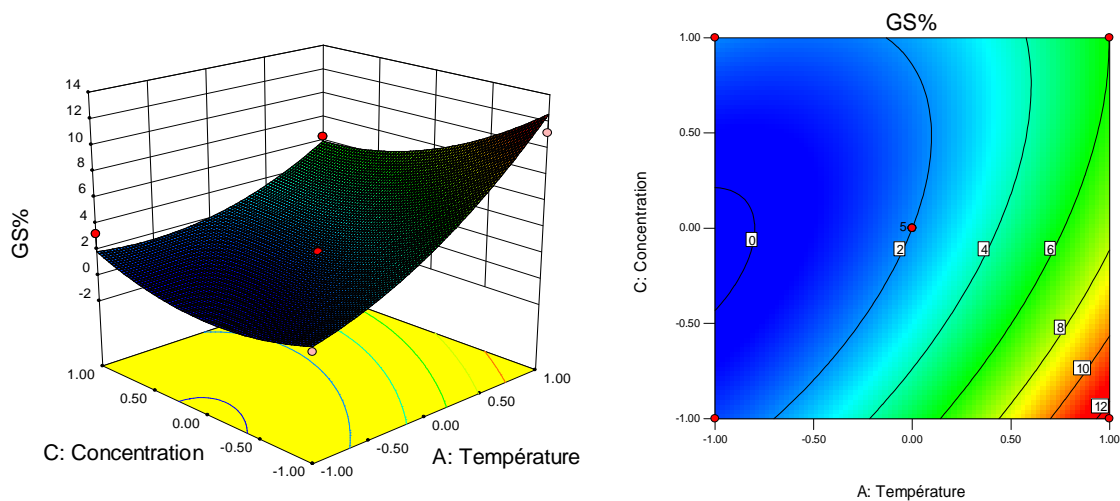
Modèle pour le gain de solides

Source	Gain de solide			
	Coefficient d'estimation	Moyenne des Carrés	F Valeur	p-valeur Prob > F
<b>Model</b>	2.00	21.84	18.12	0.0005
<b>A-Température</b>	3.88	120.44	99.92	< 0.0001
<b>B-Temps</b>	0.77	4.74	3.94	0.0877
<b>C-Concentration en saccharose</b>	-1.46	16.99	14.10	0.0071
<b>AB</b>	0.12	0.055	0.046	0.8366
<b>AC</b>	-1.83	13.36	11.08	0.0126
<b>BC</b>	-0.41	0.66	0.55	0.4820
<b>A<sup>2</sup></b>	1.72	12.51	10.38	0.0146
<b>B<sup>2</sup></b>	1.64	11.38	9.44	0.0180
<b>C<sup>2</sup></b>	1.70	12.15	10.08	0.0156
<b>Residuel</b>		1.21		
<b>Manque d'ajust.</b>		2.81		
<b>R-deux</b>		0.9588		
<b>R-deux ajusté</b>		0.9059		
<b>R-deux prédit</b>		0.9014		

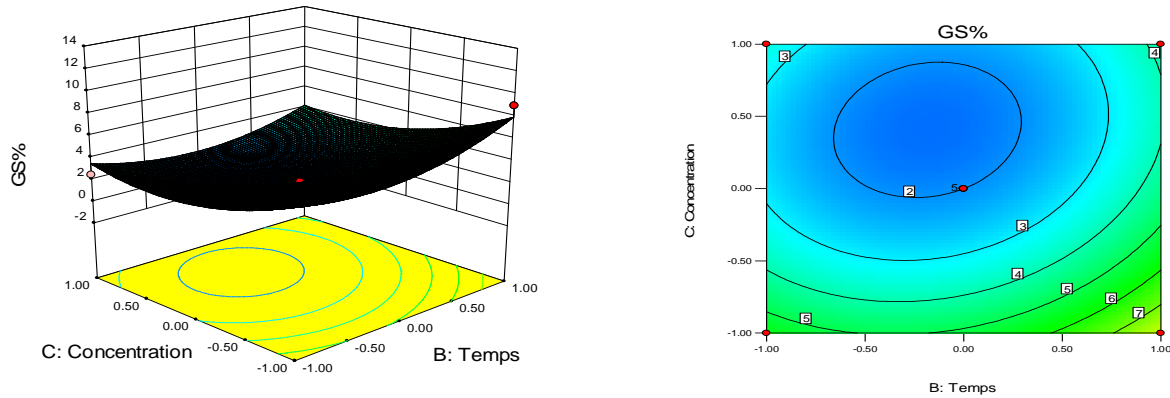
En termes interactifs, seulement l'interaction A-B présente un effet positif sur le gain de solide alors que les interactions A-C, B-C ont un effet négatif sur le GS. En outre, les termes quadratique ont un effet positif sur le gain de solide.



**Figure n° 40:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la température et du temps sur le GS des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution de saccharose.



**Figure n° 41:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la température et de la concentration en saccharose sur le GS des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution de saccharose.



**Figure n° 42:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la concentration en saccharose sur le GS des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution de saccharose.

### I.4.3. Conditions optimales de la déshydratation osmotique des cubes de pomme de terre dans une solution de saccharose

Les valeurs optimales obtenues par la substitution des codes respectifs des variables dans le cas de la déshydratation osmotique des cubes de pomme de terre dans une solution de saccharose sont : une température de 40°C, une concentration en saccharose de 60°Brix et pendant une durée de 300 min. À ce point, les valeurs de la perte en eau, la perte en poids et le gain en solide obtenus respectivement sont de: 63,28%, 60% et 3,5%.

### I.5. Optimisation de la déshydratation osmotique des rondelles de pomme de terre dans une solution de saccharose concentrée par la Méthodologie de Surface de Réponse

#### I.5.1. L'analyse statistique

**Tableau n°16 :** Les niveaux des différentes variables du processus de la déshydratation osmotique des rondelles de pomme de terre dans une solution de saccharose.

Variables indépendantes	Niveaux		
	-1	0	+1
Température (°C)	20	40	60
Temps (min)	80	150	300
Concentration en saccharose (°Brix)	40	50	60

**Tableau n° 17** : Les conditions expérimentales et les réponses obtenues par la MSR

Essais	Température	Temps	Concentration en saccharose	PP%	PE%	GS%
1	0	0	0	57.2	57.55	2.06
2	0	0	0	57.2	52.41	2.06
3	+1	-1	0	50	59	10.31
4	-1	0	+1	45.9	47.25	3.37
5	-1	+1	0	52.2	56.3	0.35
6	0	-1	+1	50.9	52.41	2.63
7	-1	0	-1	43.5	45	0.86
8	-1	-1	0	32.7	32.08	0.43
9	+1	+1	0	58.6	71.87	14.06
10	0	0	0	57.2	57.55	2.06
11	0	-1	-1	42	48.3	7.28
12	0	+1	+1	66.8	69.34	3.56
13	+1	0	-1	48	62.08	14.11
14	0	+1	-1	51.8	60.92	9.13
15	0	0	0	57.2	57.55	2.06
16	+1	0	+1	55.4	63.48	10.18
17	0	0	0	57.2	57.55	2.06

## I.5.2. Analyse de la variance (ANOVA) de l'effet des différents paramètres sur les réponses

### I.5.2.1 Ajustement du modèle

Le teste F de Fisher avec une valeur très faible de probabilité ( $p < 0.0005$ ) démontre une très grande signification du modèle et un manque d'ajustement non significatif (Tableaux 18, 19 et 20). les coefficients de regression  $R^2$  obtenus respectivement pour la perte en poids, la perte en eau et le gain de solide sont 0.9631, 0.9805 et 0.9681 . Cela implique que plus de 96% des données expérimentales sont compatibles avec les données prédites par le modèle et que moins de 4% des variations totales ne sont pas expliquées par le modèle .

L'expression mathématique de la relation entre la réponse (PP, PE, GS) et les variables du processus de la déshydratation osmotique (A, B, C) est indiquée dans les équations suivantes:



$$\text{Equation (1'')}: PP = + 57.20 + 4.71 * A + 6.73 * B + 4.21 * C - 2.72 * A * B + 1.25 * A * C + 1.52 * B * C - 6.75 * A^2 - 2.08 * B^2 - 2.25 * C^2$$

$$\text{Equation (2'')}: PE = + 57.55 + 9.48 * A + 8.33 * B + 2.02 * C - 2.84 * A * B - 0.21 * A * C + 1.08 * B * C - 3.01 * A^2 + 0.28 * B^2 - 0.084 * C^2$$

$$\text{Equation (3'')}: GS = + 2.06 + 5.46 * A + 0.81 * B - 1.46 * C + 0.96 * A * B - 1.61 * A * C - 0.23 * B * C + 2.85 * A^2 + 1.37 * B^2 + 2.22 * C^2$$

### **I.5.2.2. La perte en poids**

Le maximum de la perte en poids obtenu pour une déshydratation osmotique des rondelles de pomme de terre conduite à 40°C, 60°Brix, pendant 300 min est de 66,8% alors que le minimum est de 32.7%, et est obtenu pour une déshydratation à 20°C, 40°Brix pendant 80 min (Tableau n°17).

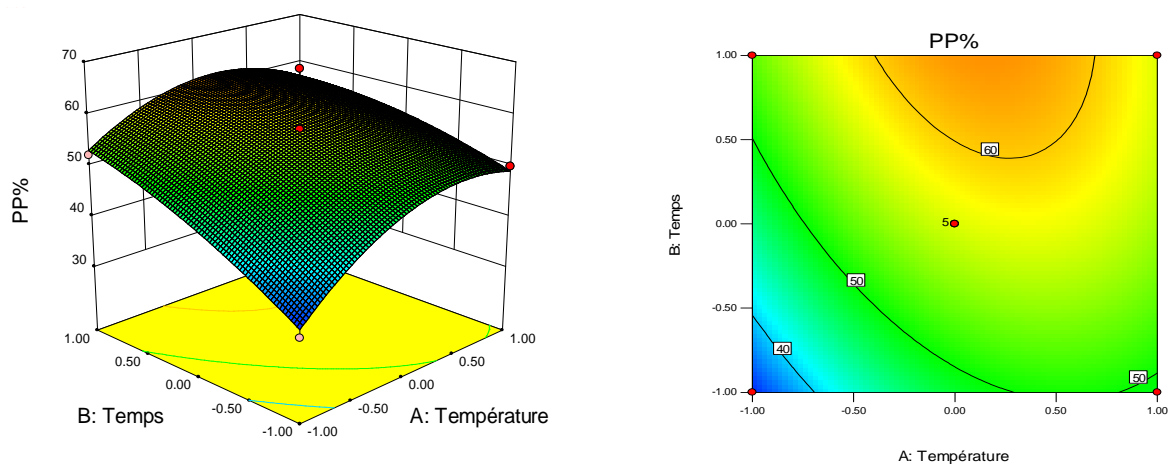
Les valeurs- $p < 0.0500$  indiquent que les termes du modèle sont significatifs, c'est le cas de A, B, C,  $A^2$ . Les termes A-B, A-C, B-C,  $B^2$ ,  $C^2$  avec des valeurs- $p > 0.0500$  ne sont pas significatifs (tableau n° 18). Les coefficients d'estimation indiquent l'influence positive sur la perte en poids de la durée de déshydratation osmotique suivie de la température puis de la concentration en saccharose de la solution osmotique, donc l'augmentation de de ces trois facteurs engendre une augmentation de la perte en poids. Ces résultats sont confirmés au niveau des figures 43 à 45.

Les interactions A-C, B-C ont un effet positif sur la perte en poids contrairement à l'interaction A-B qui a un effet négatif. Tous les termes quadratique  $A^2$ ,  $B^2$ ,  $C^2$  présentent un effet négatif sur la perte en poids des rondelles de pomme de terre.

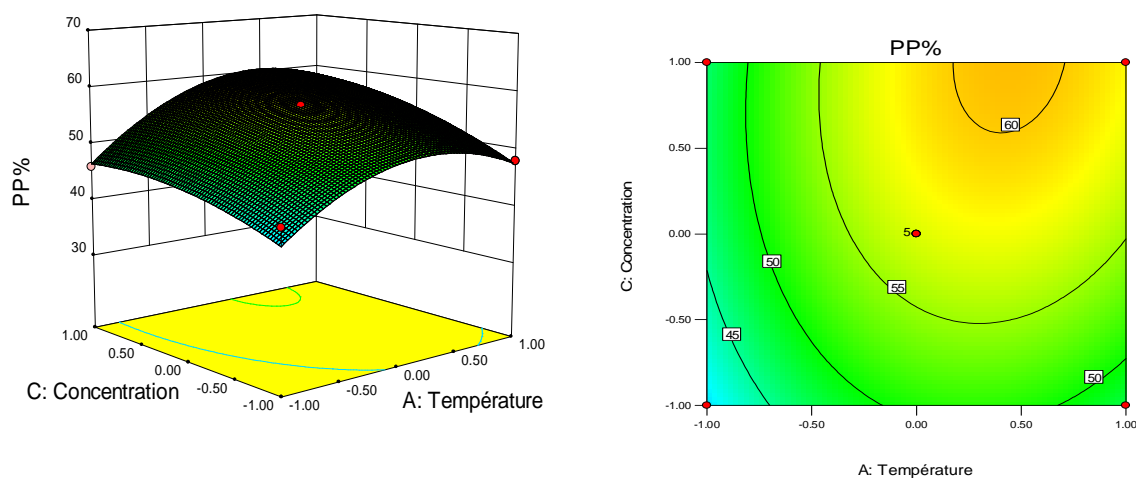
**Tableau n°18:** Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques

Modèle pour la perte en poids

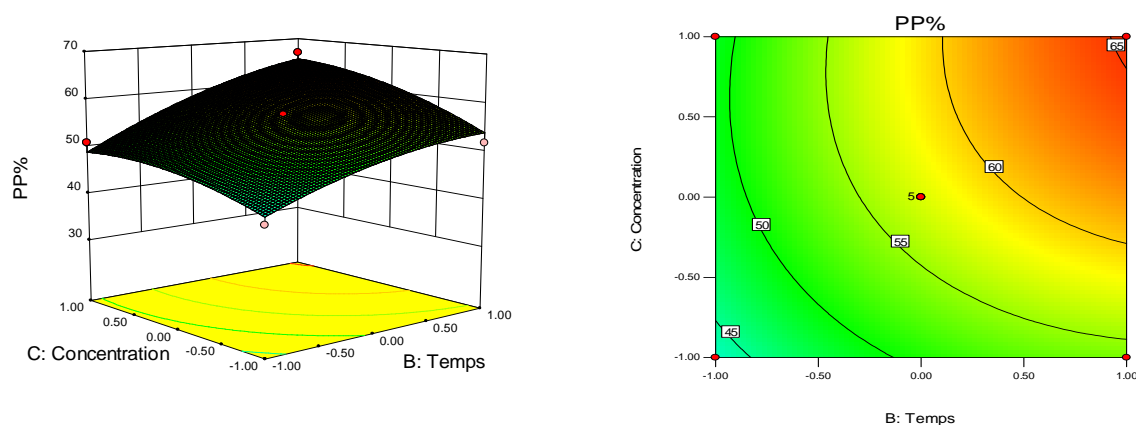
Source	Perte en poids			
	Coefficient d'estimation	Moyenne des Carrés	F Valeur	p-valeur Prob > F
<b>Model</b>	57.20	108.36	20.32	0.0003
<b>A-Température</b>	4.71	177.66	33.31	0.0007
<b>B-Temps</b>	6.73	361.81	67.84	< 0.0001
<b>C-Concentration en saccharose</b>	4.21	141.96	26.62	0.0013
<b>AB</b>	-2.72	29.70	5.57	0.0503
<b>AC</b>	1.25	6.25	1.17	0.3149
<b>BC</b>	1.52	9.30	1.74	0.2281
<b>A<sup>2</sup></b>	-6.75	191.84	35.97	0.0005
<b>B<sup>2</sup></b>	-2.08	18.13	3.40	0.1078
<b>C<sup>2</sup></b>	-2.25	21.32	4.00	0.0857
<b>Residuel</b>		5.33		
<b>Manque d'ajust.</b>		12.44		
<b>R-deux</b>		0.9631		
<b>R-deux ajusté</b>		0.9157		
<b>R-deux prédit</b>		0.9362		



**Figure n° 43:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la température sur la PP des rondelles de pomme de terre déshydratées dans une solution de saccharose.



**Figure n° 44:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la température et de la concentration en saccharose sur la PP des rondelles de pomme de terre déshydratées dans une solution de saccharose.



**Figure n° 45:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la concentration en saccharose sur la PP des rondelles de pomme de terre déshydratées dans une solution de saccharose.

### I.5.2.3. La perte en eau

Le maximum de la perte en eau est de 71.87%, et est obtenu pour une déshydratation osmotique conduite à 60°C, 40°Brix, pour une durée d'immersion de 300 min alors que le minimum est de 32.08%, obtenu pour une déshydratation osmotique réalisée dans les conditions suivantes : 20°C, 40°Brix, 80 min (tableau n°17).

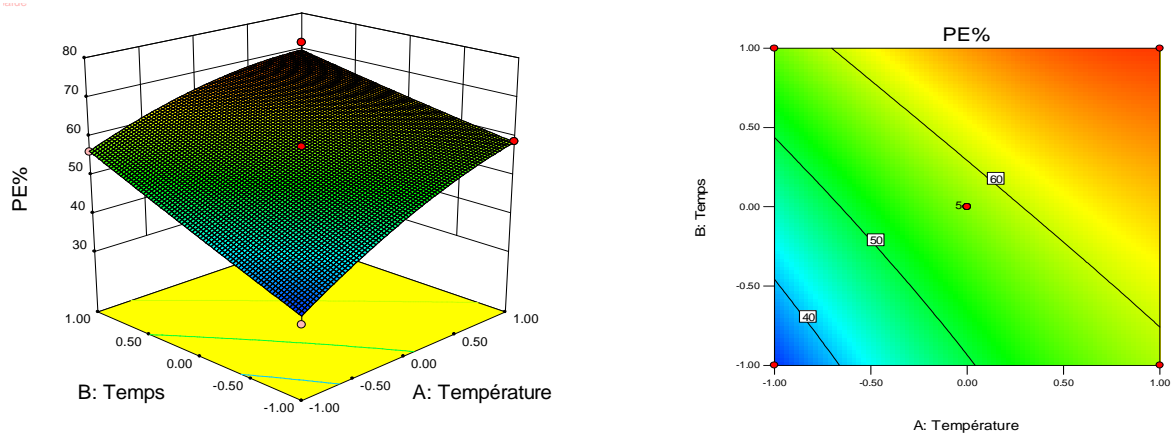
## Etude expérimentale

### Résultats et discussion

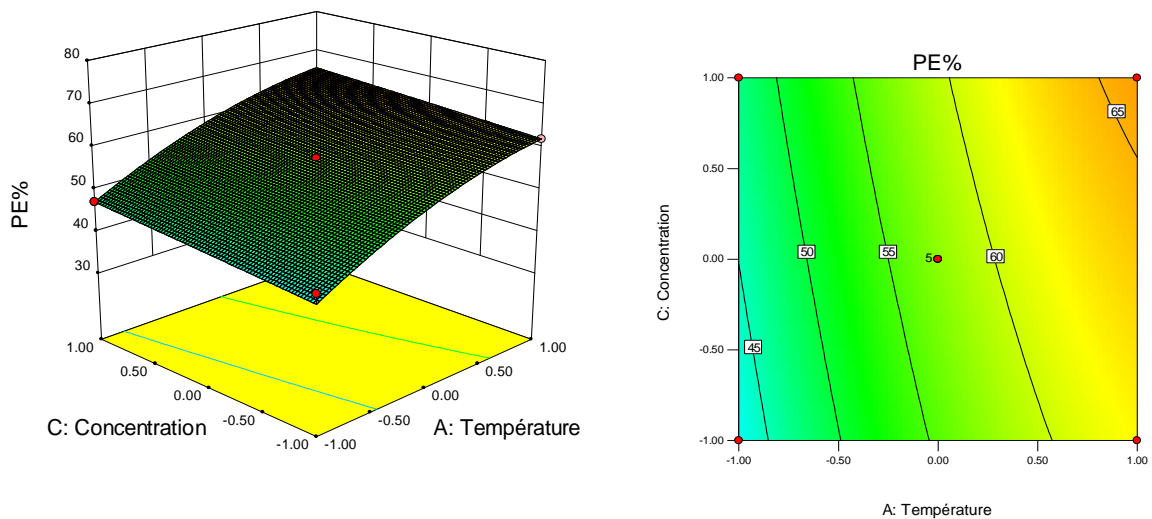
Les termes du modèle A, B, C, A-B, A<sup>2</sup> sont significatifs alors que les termes A-C, B-C, B<sup>2</sup>, C<sup>2</sup> ne sont pas significatifs (Tableau n° 19). Les coefficients d'estimation montrent une influence positive sur la perte en eau des termes linéaires du modèle A, B, C. Cela veut dire que la perte en eau des rondelles de pomme de terre augmente avec l'augmentation de : la température suivie de la durée de la déshydratation osmotique, puis de la concentration en saccharose de la solution osmotique. En termes interactif, seulement l'interaction B-C présente un effet positif sur la perte en eau. En outre les quadratiques de la température A<sup>2</sup> et de la concentration en saccharose C<sup>2</sup> ont des effets négatifs sur la PE contrairement au quadratique de la durée du processus de déshydratation osmotique B<sup>2</sup> qui présente un effet positif (figures 46, 47 et 48).

**Tableau n°19 :** Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques  
Modèle pour la perte en eau

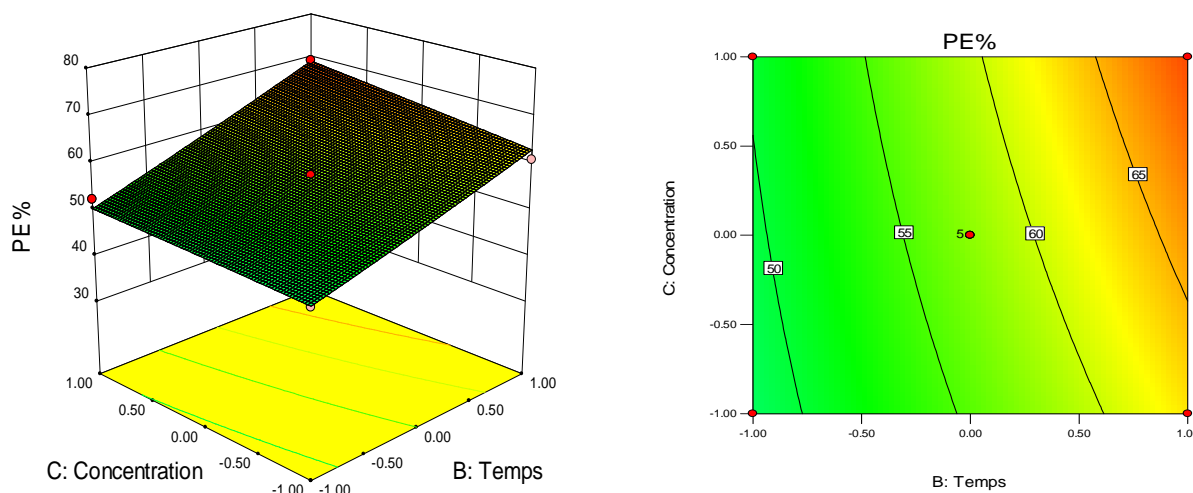
Source	Perte en eau			
	Coefficient d'estimation	Moyenne des Carrés	F Valeur	p-valeur Prob > F
Model	57.55	153.51	39.08	< 0.0001
A-Température	9.48	718.21	182.83	< 0.0001
B-Temps	8.33	555.11	141.31	< 0.0001
C-Concentration en saccharose	2.02	32.72	8.33	0.0234
AB	-2.84	32.21	8.20	0.0242
AC	-0.21	0.18	0.046	0.8363
BC	1.08	4.64	1.18	0.3129
A <sup>2</sup>	-3.01	38.24	9.74	0.0168
B <sup>2</sup>	0.28	0.32	0.082	0.7832
C <sup>2</sup>	-0.084	0.030	7.518E-003	0.9333
Residuel		3.93		
Manque d'ajust.		9.17		
R-deux		0.9805		
R-deux ajusté		0.9554		
R-deux prédit		0.9378		



**Figure n° 46:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la température sur la PE de rondelles de pomme de terre déshydratées dans une solution de saccharose.



**Figure n° 47:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la température et la concentration en saccharose sur la PE des rondelles de pomme de terre déshydratées dans une solution de saccharose.



**Figure n° 48:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la concentration en saccharose sur la PE des rondelles de pomme de terre déshydratées dans une solution saccharose.

#### I.5.2.4. Le gain de solide

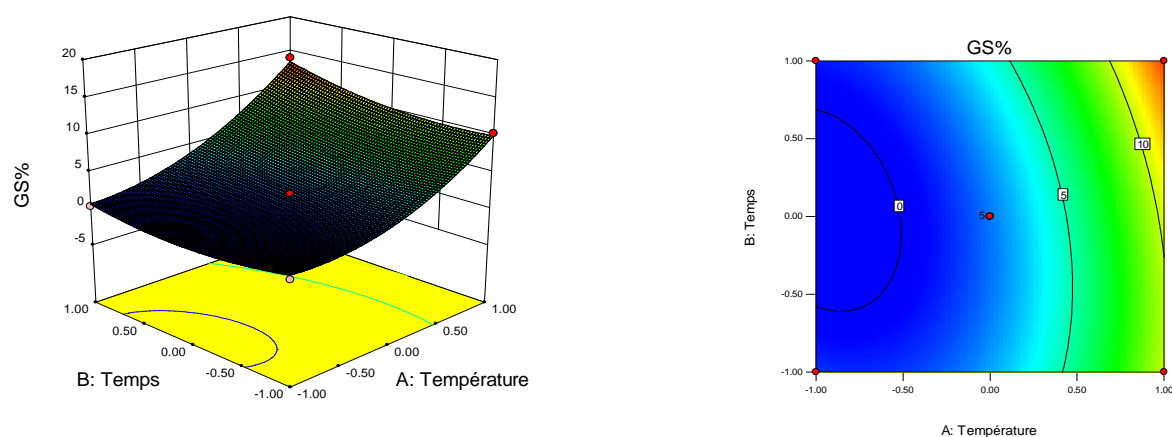
La déshydratation osmotique conduite à 60°C, 20°Brix et une durée du processus de 150 min donne un maximum de gain de solide de 14.11% alors que le minimum est de 0.35%, et est obtenu dans les conditions suivantes 20°C, 40°Brix, une durée d'immersion de 150 min (Tableau n°17).

Les valeurs- $p < 0.0500$  indiquent que les termes du modèle ont un effet significatif sur le gain de solide, c'est le cas de A, C, A-C,  $A^2$ ,  $C^2$ . Les termes B, A-B, B-C,  $B^2$  avec des valeurs- $p > 0.0500$  ont un effet non significatif sur le GS (tableau n° 20).

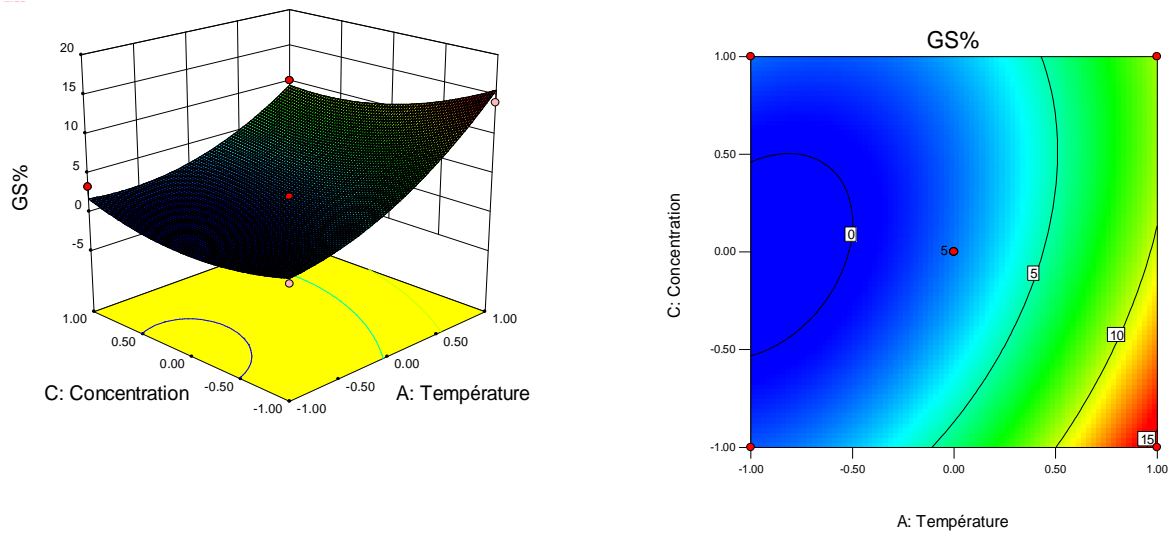
Les coefficients d'estimation indiquent l'influence positive sur le gain de solide de A et B et l'influence négative de C. Ces résultats montrent que le gain de solide augmente avec l'augmentation de la température de la solution osmotique et la durée du processus et diminue avec l'augmentation de la concentration en saccharose de la solution osmotique, ceci est clairement illustré dans les figures n° 49, 50 et 51. En termes interactifs, seulement l'interaction A-B a un effet positif sur le gain de solide contrairement aux interactions A-C, B-C qui ont un effet négatif. En outre tous les termes quadratiques  $A^2$ ,  $B^2$ ,  $C^2$  présentent un effet positif sur le gain de solide.

**Tableau n°20:** Analyse des variations (ANOVA) pour les surfaces de réponse quadratiques  
Modèle pour le gain de solide

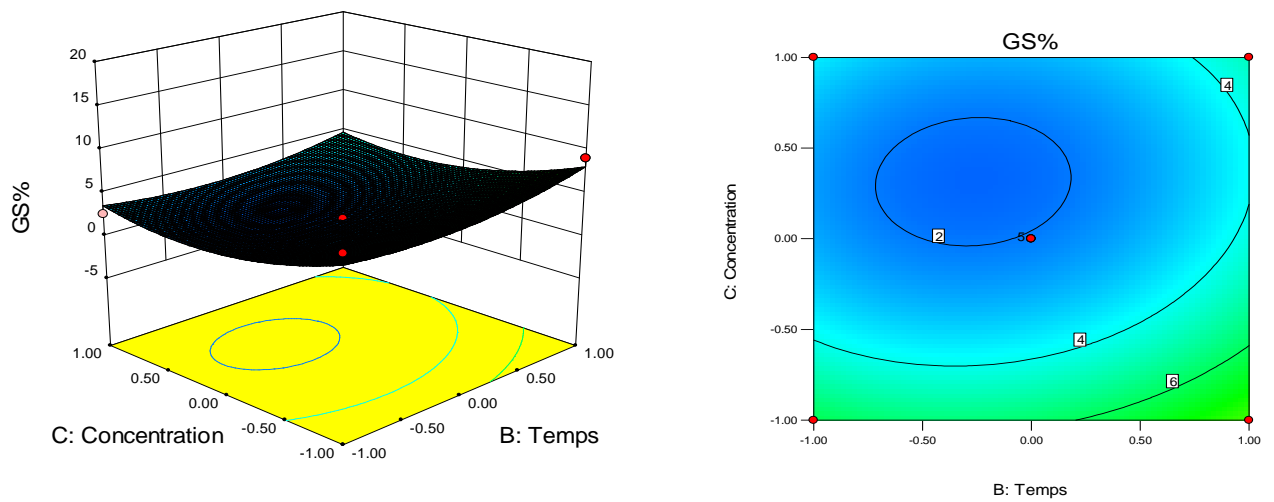
Source	Gain de solide			
	Coefficient d'estimation	Moyenne des Carrés	F Valeur	p-valeur Prob > F
<b>Model</b>	2.06	38.23	23.61	0.0002
<b>A-Température</b>	5.46	238.17	147.06	< 0.0001
<b>B-Temps</b>	0.81	5.20	3.21	0.1162
<b>C-Concentration en saccharose</b>	-1.46	16.94	10.46	0.0144
<b>AB</b>	0.96	3.67	2.26	0.1761
<b>AC</b>	-1.61	10.37	6.40	0.0392
<b>BC</b>	-0.23	0.21	0.13	0.7284
<b>A<sup>2</sup></b>	2.85	34.29	21.17	0.0025
<b>B<sup>2</sup></b>	1.37	7.95	4.91	0.0623
<b>C<sup>2</sup></b>	2.22	20.68	12.77	0.0091
<b>Residuel</b>		1.62		
<b>Manque d'ajust.</b>		3.78		
<b>R-deux</b>		0.9681		
<b>R-deux ajusté</b>		0.9271		
<b>R-deux prédit</b>		0.9197		



**Figure n° 49:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la température sur le GS des rondelles de pomme de terre déshydratées dans une solution de saccharose.



**Figure n° 50:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet de la température et la concentration en saccharose sur le GS des rondelles de pomme de terre déshydratés dans une solution de saccharose.



**Figure n° 51:** Surface de réponse et tracé de contour de l'effet du temps et de la concentration en saccharose sur le GS des rondelles de pomme de terre déshydratées dans une solution de saccharose.



### **I.5.3. Conditions optimales de la déshydratation osmotique des rondelles de pomme de terre dans une solution de saccharose**

Les valeurs optimales obtenues par la substitution des codes respectifs des variables dans le cas de la déshydratation osmotique des rondelles de pomme de terre dans une solution de saccharose sont : une température de 40°C, une concentration en saccharose de 60°Brix et pendant une durée de 300 min. À ce point, les pourcentages de la perte en eau, la perte en poids et le gain en solide obtenus respectivement sont de : 69,34%, 66,8% et 3,56%.

## **II. Influence de la forme géométrique des échantillons sur la déshydratation osmotique**

Dans le but de déterminer l'influence de la forme géométrique des échantillons de pomme de terre sur la déshydratation osmotique dans une solution de saccharose, nous avons utilisé les cubes et les rondelles de PDT.

D'après les tableaux (n°12,17), le maximum de perte en eau obtenu pour les cubes est de 65,4% avec un gain en soluté de 6,4% alors que pour les rondelles le maximum de perte en eau obtenu est de 71,87% avec un GS de 14,06%. Dans les mêmes conditions de déshydratation osmotique (40°C, une concentration en saccharose de 60°Brix et une durée du processus de 300 min) nous avons obtenu les valeurs optimales de perte en eau et de gain en solide pour les cubes et les rondelles qui sont : 63,28% et 3,5% pour les cubes et 69,34%, 3,56% dans le cas des rondelles. En général, les valeurs de perte en eau et de gain en solide obtenues avec les rondelles sont supérieures à celles obtenues avec les cubes de pomme de terre. Ces résultats s'expliquent par l'augmentation de la surface spécifique des morceaux de pomme de terre qui augmente la vitesse de déshydratation jusqu'à un seuil à partir duquel, le traitement du produit trop divisé se traduit par des gains de soluté plus importants (**Lerici et al., 1985**). Probablement, parce que les échanges de soluté sont limités à la périphérie des produit (**Guilbert et al., 1990**).

## **III. Les isothermes de sorption des pommes de terre**

### **III.1. Détermination expérimentale des isothermes de désorption des pommes de terre déshydratées partiellement par osmose à 40 et 60°C**

A l'aide d'une balance électronique à affichage numérique, chaque échantillon était pesé régulièrement par intervalle de temps de cinq jours, jusqu'à l'obtention d'une masse fixe

indiquant la fin de l'échange entre le produit et l'air ambiant. Ceci caractérise la position d'équilibre hygroscopique.

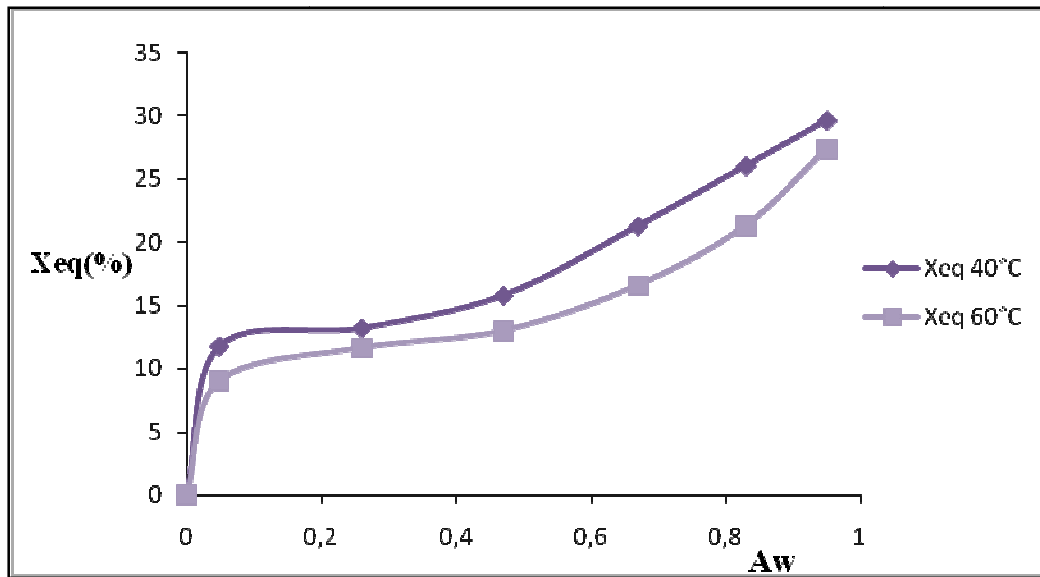
Les valeurs expérimentales de la teneur en eau à l'équilibre de la pomme de terre variété *Spunta*, déterminées après 21 jours, pour chaque activité de l'eau ( $a_w$ ) et pour deux températures différentes sont présentées sur le Tableau n° 29. La teneur en eau à l'équilibre pour chaque activité de l'eau représente la valeur moyenne de la teneur en eau de trois échantillons.

**Tableau n° 21:** Teneurs en eau à l'équilibre  $X_{eq}$  (g d'eau /100g de matière sèche) pour l'isotherme de désorption de la pomme de terre

Température (°C)	$A_w$	$X_{eq}$ (%)
<b>40</b>	0.95	29,65
	0.83	27,06
	0.67	21,3
	0.47	15,8
	0.26	13,2
	0.049	11,78
<b>60</b>	0.95	27,42
	0.83	21,34
	0.67	16,61
	0.47	13,3
	0.26	11,64
	0.06	9,04

### III.2. Courbes des isothermes de désorption

La figure n° 52 illustre les isothermes de désorption à 40 et 60°C des pommes de terre partiellement déshydratées. Ces isothermes ont une allure sigmoïdale (isotherme de type II), des résultats semblables à ceux obtenus par **Figen Kaymak-Erstein et al.,(2003)** pour la pomme de terre. Ceci est en concordance avec le comportement des autres produits agroalimentaires et plantes médicinales et aromatiques ( **Iglesias H.A. et al., 1999**).



**Figure n° 52** : Isotherme de désorption à 40°C et 60°C pour la pomme de terre

### III.2.1.Effet de la température

L'effet de la température sur l'isotherme de sorption est d'une grande importance étant donné que les aliments sont exposés à une gamme de température durant le traitement et le stockage. Elle affecte la mobilité des molécules d'eau et l'équilibre dynamique entre la vapeur et les phases adsorbées (Iglesias H.A. et Chirifie J., 1999).

Les courbes de la figure n° 52 montrent que pour une même activité de l'eau, la teneur en eau d'équilibre du produit diminue lorsque la température augmente ceci indique que les échantillons de pomme de terre deviennent moins hygroscopiques. Ces observations sont en accord avec les travaux antérieurs de Litchfield et Okos (1992); Iguedjtal T. et al., (2007) pour ce qui est des isothermes de pomme de terre, et d'autre part (Amaral et al., 1999; Ahouannou et al.,2000) sur l'étude des isothermes des produits d'origine biologique.

Ce phénomène pourrait être provoquée par une augmentation de la chaleur de désorption dans le cas des températures élevées, ce qui permet de réduire la teneur en eau à l'équilibre (**Kechaou et al., 1999 et Saravacos, 1995**).

### **III.3. Modélisation mathématique des isothermes de désorption**

Le modèle utilisé est celui de **Guggenheim, Anderson et De Boer** dit modèle "G.A.B." (**1966**). Ce modèle permet une représentation satisfaisante des isothermes de sorption dans une gamme d'activité large (0,05-0,9) avec seulement trois paramètres qui ont une interprétation physique dans le cadre des théories de désorption. Il facilite l'exploitation des données expérimentales et indique la teneur en eau associée à la mono-couche (représentée par le paramètre « **X<sub>m</sub>** » dans l'équation de G.A.B.

Les résultats expérimentaux déterminant les isothermes de sorption ont subi une interpolation polynomiale effectuée selon le modèle mathématique de GAB.

Un programme d'optimisation par régression non linéaire donné par le logiciel *Satistica* version 9.0 et une méthode d'estimation proposée par **Rosenbork et Quasi-Newton**, ont été utilisés pour le lissage polynomial des courbes des isothermes de sorption et pour évaluer les paramètres du modèle de GAB.

#### **III.3.1. Paramètres du modèle de GAB**

Les paramètres de l'équation de GAB (à trois et cinq paramètres) déterminés à partir des résultats expérimentaux en utilisant la régression non linéaire sont présentés sur les tableaux 22 et 23. D'après le tableau n° 22 la teneur en eau de la couche monomoléculaire diminue de 11,5 % à 8,94% lorsque la température s'élève de 40 °C à 60°C. Ces molécules d'eau caractérisées par une chaleur de sorption élevée, ont une mobilité pratiquement nulle et ne peuvent participer à aucune interaction ou réaction. Ces molécules d'eau sont considérées comme une partie intégrante de la phase solide.

Les valeurs de K et C obtenues pour les isothermes de sorption à 40 et 60°C sont en accord avec les résultats de **Lewicki P.P. (1997)** qui a rapporté que les isothermes de sorption sont caractérisés par une k comprise entre  $0.24 < K \leq 1$  et une C comprise  $5.67 < C \leq \infty$ .

**Tableau n° 22 :** Constantes de l'équation de GAB à trois paramètres.

Equation	Température	Paramètres de l'équation				
		A <sub>w</sub>	X <sub>m</sub> (%MS)	C	K	R
GAB (3paramètres)	40 °C	0.049 à 0.95	11,5	1555,714	0,653461	0.99415
	60°C	0.06 à 0.95	8,94	1171,266	0,706521	0.99823

**Tableau n° 23 :** Constantes de l'équation de GAB à cinq paramètres.

Equation	Température	Paramètres de l'équation						
		A <sub>w</sub>	X <sub>m</sub> (%MS)	C <sub>0</sub>	K <sub>0</sub>	ΔH <sub>C</sub> (KJ/mole)	ΔH <sub>K</sub> (KJ/mole)	R
GAB : 5 paramètres	40°C	0.049 à 0.95	11,5	1475,916	0.696267	137,3438	-166,606	0.99
	60°C	0.06 à 0.95	8,94	1130,946	0,783063	97,97138	-288,731	0.99

Le paramètre  $\Delta H_C$  de l'équation G.A.B à cinq paramètres Tableau n° 23 représente la différence entre l'enthalpie (chaleur de sorption) de la couche monomoléculaire et celle de la multicouche. Dans cette étude, la valeur  $\Delta H_C$  est estimée à 137,3438 kJ/mole à une température de 40 °C et 97,97138 KJ/mole pour une température de 60°C.

Ces valeurs positives indiquent que  $H_m$  est supérieure à  $H_n$  donc la chaleur de sorption de la monocouche est nettement supérieure à celle de la multicouche. Ceci est expliqué par la forte liaison entre les sites hydrophiles primaires du solide et la première couche des molécules d'eau.  $\Delta H_K$  qui représente la différence entre la chaleur latente de condensation de l'eau pure

et la chaleur de sorption de la multicouche est estimée à (-166,606 kJ/mole) à 40°C et à (-288,731 kJ/mole) à 60°C (Tableau n°23). Cela veut dire  $H_n$  est supérieure à  $H_L$ , donc la chaleur de sorption de l'eau libre est inférieure à la chaleur de sorption de la multicouche. Cette valeur négative montre que l'énergie nécessaire pour libérer l'énergie de sorption des multicouches est supérieure à celle de l'eau pure, ceci s'explique par la forte liaison de l'eau des multicouches de la matière biologique par rapport à l'eau libre. Ces résultats sont similaires à ceux trouvés par (Lim. et al., 1995 ; Ferradji et al., 2008 ).

### III.3.2. Ajustement des valeurs expérimentales au modèle de GAB

L'ajustement des valeurs expérimentales de la teneur en eau au modèle GAB était réalisé à l'aide du logiciel *Statistica 9.0* dont la méthode d'estimation utilisée est celle de Quasi-Newton.

**Tableau n° 24 :** Les teneurs en eau expérimentales et prévues d'après le modèle GAB.

Températures (°C)	$A_w$	Teneur en eau expérimentale (%)	Teneur en eau prévue (%)
40	0.95	29.65	30,25
	0.83	26,06	24,98
	0.67	21,3	20,51
	0.47	15,8	16,58
	0.26	13,2	13,81
	0.049	11,78	11,75
60	0.95	27,42	26,98
	0.83	21,34	21,79
	0.67	16,61	16.85
	0.47	13,3	13,31
	0.26	11,64	10.99
	0.06	9,04	9,23

L'équation de GAB prévoit les isothermes de sorption avec des faibles valeurs de P (%), ces valeurs calculées pour les deux températures ( 40 et 60°C) sont inférieurs à 10 %, ce qui permet de conclure que l'équation de GAB peut être utilisée pour prédire la valeur de la

teneur en eau à l'équilibre, et d'autres paramètres tels que la teneur en eau de la couche mono moléculaire, et les enthalpies de liaison de la monocouche et la multicouche.

**Tableau n° 25:** Valeurs de P (%) et SCM (%) calculées pour le modèle GAB.

Les valeurs calculées	Les températures	
	40°C	60°C
<b>P (%)</b>	3,04	1,26
<b>SCM (%)</b>	3,19	2,46

Les sommes des carrés moyens (SCM) des teneurs en eau expérimentales et prévues représentées dans le tableau n° 33 sont inférieures à 10% d'où la bonne qualité de l'ajustement des résultats expérimentaux avec le modèle GAB (Laughlin et Magee 1998).

### III.3.3. Calcul de la chaleur de sorption de la couche monomoléculaire et la multicouche

La résolution de l'équation de G.A.B par la régression non linéaire donne la valeur de  $\Delta H_K$  et  $\Delta H_C$  (Tableau n° 31). L'estimation de la chaleur de désorption de la couche monomoléculaire ( $H_m$ ) et de la multicouche ( $H_n$ ) a été faite à l'aide des équations (4\*) et (5\*), sachant que :

$H_L$  : chaleur latente de vaporisation de l'eau pure 43.98 (KJ /mole) (10500 cal /mole).

La masse moléculaire d'une molécule d'eau est prise égale à 18g.

**Tableau n° 26:** Chaleurs de désorption de la couche monomoléculaire et de la multicouche d'eau de la pomme de terre.

Chaleurs Isotherme	H <sub>m</sub>		H <sub>n</sub>	
	J /mole	KJ /Kg d'eau	J /mole	KJ /Kg d'eau
<b>Désorption à 40°C</b>	44282,94	2460,16	44145,6	2452,53
<b>Désorption à 60°C</b>	45399,67	2522,2	44268,731	2459,37

D'après les résultats du tableau n° 26 on remarque que la chaleur de désorption de la couche mono-moléculaire pour les deux températures (40°C et 60°C) est légèrement supérieure à celle de la multicouche. Cela est probablement dû à une forte fixation des molécules d'eau. Dans la monocouche, les molécules d'eau sont fortement fixées aux sites polaires par des liaisons hydrogènes de fortes énergies. Alors que les molécules d'eau dans la multicouche sont retenues par des liaisons hydrogènes dont les énergies sont de moins en moins fortes (**Multon, 1982**). Cela explique que l'eau de la couche monomoléculaire est relativement difficile à extraire par simple séchage par entraînement (**Multon et al., 1980**).

La chaleur de désorption de la multicouche  $H_n$  estimée à 2452,53 Kj/Kg d'eau nous renseigne sur la quantité de chaleur nécessaire pour éliminer l'eau faiblement liée des pommes de terre osmotiquement déshydratées. A titre d'exemple, pour diminuer la teneur en eau de 1Kg des pommes de terre, prétraitées par osmose, de 67,02 % à 11,78% pour une température de 40 °C et à une teneur en eau 9,04% pour une température de 60 °C, il est nécessaire de déterminer la capacité du séchoir en KWh.

L'énergie nécessaire pour évaporer cette eau est calculée en utilisant les équations (10\*) et (11\*).

On trouve :

➤ Pour 40°C :

La quantité d'eau à évaporer  $m_e = 0.40468$  kg d'eau.

La capacité du séchoir :  $Q = 1535,68$  kJ.

Sachant que 1 KWh =  $3.6 \times 10^3$  kJ, on aura alors :  $Q = 0.426$  KWh.

➤ Pour 60°C :

La quantité d'eau à évaporer  $m_e = 0.6374$  kg d'eau.

La capacité du séchoir :  $Q = 1567,65$  kJ.

Sachant que 1 KWh =  $3.6 \times 10^3$  kJ, on aura alors :  $Q = 0.435$  KWh.



D'après ces résultats, le séchoir doit être conçu avec une capacité supérieure à **0.426** KWh pour diminuer la teneur en eau initiale des pommes de terre de 67,02 % à 11,78% pour une température de 40 °C et à une capacité supérieure à **0.435** KWh pour réduire la teneur en eau jusqu'à 9,04% à une température de 60 °C.




#### **IV. Friture des chips de pomme de terre**

Les durées de friture des chips de pomme de terre à 170°C sont représentées dans le tableau 27.

**Tableau n° 27:** durée de friture des chips de pomme de terre

<b>Chips</b>  <b>Echantillons</b>	<b>Durée de friture (secondes)</b>		
	<b>Chips naturelles</b>	<b>Chips déshydratées avec le saccharose</b>	<b>Chips déshydratées avec le sel ( NaCl)</b>
1	70	44	54
2	78	43	60
3	73	46	54
4	73	42	54
<b>Moyenne</b>	<b>73,5</b>	<b>43,75</b>	<b>55,5</b>

On note que le temps de friture des chips déshydratées est plus court par rapport aux chips naturelles (Tableau 27). Cela signifie que les transferts de chaleur se font plus rapidement pour les produits déshydratés, ce qui peut être expliqué par :

-  une quantité d'eau plus importante contenue dans les chips brutes qui a tendance à freiner la progression du front de chaleur ;
-  une quantité de vapeur d'eau qui se dégage et qui perturbe considérablement les transferts de chaleur au niveau de l'interface bain d'huile/produit. Cette perturbation dure plus longtemps pour les chips brutes ;
-  Le saccharose ajouté à la composition des chips déshydratées absorbe la chaleur et facilite sa transmission aux chips. Ces résultats sont confirmés par ceux obtenus par

Mbaye C.T., Ndour C. (2004) dans l'étude du procédé combiné déshydratation osmotique-friture pour la valorisation de la mangue.

#### **IV.1. La qualité organoleptique des chips**

La qualité organoleptique est un critère très important pour la consommation des chips de pomme de terre, un goût «naturel», une texture «croustillante» et une couleur «dorée» sont les critères recherchés. Nous avons constaté que les rondelles de pomme de terre déshydratées dans une solution salées de NaCl sont les plus croustillantes et que les chips déshydratées dans une solution de saccharose sont plus dorées et plus dures à croquer. Ceci peut être expliqué par la réaction de Maillard qui confère aux aliments une couleur brune.



**Figure n° 53:** Chips de pomme de terre

## **Conclusion**

La présente étude nous a permis d'optimiser la déshydratation osmotique partielle de la pomme de terre et d'obtenir les résultats suivants :

Les valeurs des coefficients de régression qui varient entre 0.93 et 0.99 obtenues lors de la modélisation mathématique ont confirmé la validité du modèle d'Azura et al. (1998) en continu.

Pour les cubes de pomme de terre, nous avons abouti à un taux d'élimination d'eau maximum de 45% du poids initial des échantillons et un gain de solide de 6,3% lors d'une déshydratation osmotique réalisée à une température de 40°C, une concentration en sel de 5% et pendant une durée de traitement de 300min alors que pour une déshydratation osmotique dans un sirop de saccharose à une concentration de 60°B, une température de 60°C et un temps d'immersion de 150 min nous avons obtenu un taux d'élimination d'eau maximum de 65,4% du poids initial des cubes de PDT avec un gain de solide de 6,4%.

Pour les rondelles de PDT, une perte en eau maximale de 71.87% a été obtenue pour une déshydratation osmotique conduite à une température de 60°C, une concentration en saccharose de 40°B, pendant 300 min avec un gain de solide de 14,06%.

Dans cette étude la MSR a été utilisée pour déterminer les conditions optimales de la déshydratation osmotique de la PDT qui permettent d'obtenir un maximum de perte en eau et un minimum de gain de solide. L'analyse de la variance a montré que les modèles proposés par le design expérimental sont significatifs.

- Dans le cas des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution saline, les conditions optimales sont : une température de 40°C, une concentration en sel de 5% et une durée de 300 min. À ce point, les valeurs de la perte en eau, la perte en poids et le gain en solide obtenues respectivement sont : 45%, 40% et 6.3% ;
- Dans le cas des cubes de pomme de terre déshydratés dans une solution de saccharose, les conditions optimales sont : une température de 40°C, une concentration en saccharose de 60°B et pendant une durée de 300 min. À ce point, les valeurs de la perte en eau, la perte en poids et le gain en solide obtenues respectivement sont : 63,28%, 60% et 3,5% ;
- Pour les rondelles de pomme de terre, Les valeurs maximales de la perte en eau (PE), la perte en poids (PP) et le gain de solide (GS) qui sont respectivement : 69,34%, 66,8% et 3,56% sont obtenues dans les conditions de déshydratation osmotique suivantes : une

## *Conclusion*

---

température de 40°C, une concentration en saccharose de 60°B et pendant une durée de 300 min.

Dans les mêmes conditions de déshydratation, le maximum de la perte en eau de 69,34%, a été observé dans le cas des rondelles de pomme de terre.

Les résultats de la MSR ont montré que la perte en eau (PE) et le gain de solide (GS) sont influencés significativement par la température, la concentration en agent osmotique (sucre ou sel) et par la durée d'immersion.

Les techniques graphiques (surfaces de réponse et tracés de contour), en connexion avec la MSR, ont aidé à localiser l'exploitation des conditions optimales de la DO, qui ont été expérimentalement vérifiées.

La détermination des isothermes de désorption constitue une étape incontournable dans tout procédé de séchage. Leurs connaissances sont indispensables pour mieux comprendre et appréhender les problèmes liés à l'expérimentation et à la modélisation des processus de séchage.

A partir des résultats obtenus, nous pouvons conclure que les isothermes de désorption de la pomme de terre ont une allure sigmoïdale (isotherme de type II), l'application du modèle de GAB, a permis de déterminer la teneur en eau de la couche monomoléculaire à 40°C et 60°C qui est évaluée respectivement à 11,5 % et 8,94 %.

Les chaleurs de désorption de la couche monomoléculaire  $H_m$  et de la multicouche  $H_n$  des PDT estimées par l'équation de Clausius – Clapeyron sont respectivement 2460,16 KJ /Kg d'eau et 2452,53 KJ /Kg d'eau à 40°C, alors que pour une température de 60°C les chaleurs de désorption de  $H_m$  et  $H_n$  sont respectivement égales à 2522,2 KJ /Kg d'eau et 2459,37 KJ /Kg d'eau.

Pour un éventuel séchage, le séchoir doit être conçu avec une capacité supérieure à **0.426** KWh pour diminuer la teneur en eau initiale des pommes de terre de 67,02 % à 11,78% pour une température de 40 °C et pour une capacité supérieure à **0.435** KWh pour réduire la teneur en eau jusqu'à 9,04% à une température de 60 ° C.

L'utilisation des rondelles de pomme de terre préalablement déshydratées pour la préparation des chips a permis de réduire le temps de friture de 40,47 % pour les chips sucrées et de 24,48 % pour les chips salées.

## *Conclusion*

---

A travers ce travail, l'introduction de la déshydratation osmotique dans le processus de transformation de la pomme de terre permet une réduction du temps de cuisson, un gain d'énergie et, moyennant la prise en compte de l'effet des apports en solutés par imprégnation, une préservation de la qualité nutritionnelle du produit traité. Ainsi, l'utilisation de la DO permet un meilleur contrôle et une maîtrise de la qualité des produits finis.

Dans l'avenir, il serait intéressant de compléter notre présent travail par d'autres études plus approfondies, ainsi on préconise comme perspectives :

- Compléter la déshydratation osmotique de la PDT par un traitement thermique (séchage ou congélation) ou chimique afin de parfaire la stabilisation du produit fini ;
- Effectuer des études sur la qualité organoleptique des PDT déshydratées ;
- Réaliser la friture sous vide ;
- Etudier la qualité technologique des chips préalablement déshydratées ( teneur en sucres réducteurs, teneur en matière sèche...).

## Referenes bibliographiques

### A

- **Abud-Archila M. et al., 2008.** Optimization of osmotic dehydration of yam bean (*Pachyrhizus erosus*) using an orthogonal experimental design. *J. Food Eng.*, n.84, p.413-419.
- **Adamrounou L.T., Conway J. & Castaigne F., 1994.** Influence de la déshydratation partielle par osmose sur la composition de tranches de pomme. *Sci. Aliments*, n.14, p.75-85.
- **Ade-Omowaye B.I.O., Rastogi N.K., Angersbach A. & Knorr D., 2003.** Combined effects of pulsed electric field pre-treatment and partial osmotic dehydration on air drying behaviour of red bell pepper. *J. Food Eng.*, n.60, p. 89-98.
- **Agnelli M.E., Marani C.M. & Mascheroni R.H., 2005.** Modelling of heat and mass transfer during (osmo) dehydrofreezing of fruits. *Food Eng.*, n.69, p. 415-424.
- **Ahouannou C., Jannot Y., Lips B. & Lallemand A., 2000,** Caractérisation et modélisation du séchage de trois produits tropicaux: manioc, gingembre et gombo, *Sciences des aliments*, n.20, p.413-432.
- **Ajibola O.O. & Adams B.A., 1986,** Desorption equilibrium moisture content of cassava at several temperatures, *Inter. Agrophysics*, vol.2, n.3,p. 235-239.
- **Alais C., Linden G., Laurent M., 2008.** Biochimie alimentaire. 6 ème édition de l'abrégé. Paris, Dunod, 260 p.
- **Albagnac P.G., Varoquaux J. & Montigaud C.I., coord., 2002.** *Technologies de transformation des fruits*. Paris , Lavoisier-Tec & Doc.dfrt.
- **Amaral D.O., Sorbal P.J.D., Lebert A., Bimbenet J.J., 1999.** Isothermes de désorption de la pomme de terre entre 40 et 70 °C. *Science des aliments* .1999, vol.19, p. 711-720.
- **Anonyme, 1998a.** Catalogue français des variétés. Le plant de pomme de terre français (HANVEC). Fédération Nationale des Producteurs de Plants de Pomme de Terre (FNPPPT) : [www.plantdepommeeterre.org](http://www.plantdepommeeterre.org)
- **Anonyme, 1998b.** Le cycle végétatif de la pomme de terre. Le plant de pomme de terre français (HANVEC). Fédération Nationale des Producteurs de Plants de Pomme de Terre (FNPPPT) : [www.plantdepommeeterre.org](http://www.plantdepommeeterre.org)
- **Anonyme, 1999.** Cahier de références techniques. Micropropagation pour l'entreprise serricole. Centre d'Information et de Développement Expérimental en Serriculture (CIDES) : [www.cides.qc.ca](http://www.cides.qc.ca)
- **Anonyme, 2000a.** Histoire de la pomme de terre. Fédération des Producteurs de Pomme de Terre de Québec (FPPTQ) : [www.fpptq.qc.ca](http://www.fpptq.qc.ca)
- **Anonyme, 2000b.** Valeur nutritionnelle de la pomme de terre. Fédération des Producteurs de Pomme de Terre de Québec (FPPTQ) : [www.fpptq.qc.ca](http://www.fpptq.qc.ca)
- **Anonyme, 2001a.** La pomme de terre : [www.objectif\\_forme.com](http://www.objectif_forme.com)
- **Anonyme, 2001b.** The effect of the sucrose concentration on the micropropagation of potato. Projet en vue de l'obtention du degré de B.Sc. (Hons) en Agriculture, option : Biotechnologie Agricole (Université des îles Maurice) : [www.geocities.com](http://www.geocities.com).

- **Anonyme, 2003.** Age physiologique et préparation des semences. Ministère de l'Agriculture, des Pêches et de l'Aquaculture : [www.gnb.ca](http://www.gnb.ca)
- **Anonyme, 2004a.** La pomme de terre. Encarta 2004.
- **Anonyme, 2004b.** L'Algérie premier pays importateurs de produits agricoles de l'UE. Le matin : quotidien Algérien : 25 Avril 2004.
- **Anonyme, 2010a.** Une « boîte à outils » pour réduire la teneur en acrylamide des produits à base de pommes de terre frites: les chips', Commission européenne - DG de la santé et des consommateurs.
- **Anonyme, 2011.** [http://potatoes.hbdc860.myinstance.net/fr/blog\\_fr/?p=168](http://potatoes.hbdc860.myinstance.net/fr/blog_fr/?p=168).
- **Azuara E., Corts R., Garcia H.S. et Beristain C.,1992.** Kinetic model for osmotic dehydration and its relationship with Fick's Second Law. *International Journal of Food Science and Technology*, n. 27, p.409 -418.
- **Azuara E., Beristain C.I. & Gutiérrez G.F., 1998.** A method for continuous kinetic evaluation of osmotic dehydration. *Lebensm. Wiss. Technol.*, n.31, p.317-321.

## B

- **Baron V., 2010.** Application de la déshydratation osmotique au confisage des fruits. CIRAD. p.1.
- **Barbanti D., Mastrocola D. & Pizzarani S., 1995.** Air drying of plums influence of some process parameters on the specific drying kinetics, *Sciences des aliments*, n.15, p.19-29.
- **Bchir B., Besbes S., Attia H. & Blecker C., 2009.** Osmotic dehydration of pomegranate seeds: mass transfer kinetics and DSC characterization. *Int. J. Food Sci. Technol.*, n.44, p.2208-2217.
- **Bchir B., Besbes S., Attia H. & Blecker C.** Osmotic dehydration of pomegranate seeds (*Punica granatum* L.): effect of freezing pre-treatment. *J. Food Process Eng.* (DOI: 10.1111/j.1745-4530.2010.00591.x) (in press).
- **Belahimidi E., Belghit A., Mrani A., Mir A. & Kaoua M., 1993.** Approche expérimentale de la cinétique de séchage des produits agroalimentaires: application aux peaux d'oranges et à la pulpe de betterave, *Rev. Gén. Therm.* n.20, p.1073-1089.
- **Belarbi A., Aymard Ch., Meot J.M., Themelin A., Reynes M., 2000.** Water desorption isotherms for eleven varieties of dates. *Journal of food engineering*, vol.43, p.103-107.
- **Beristain C.I., Azuara E., Cortes R. and Garcia H.S., 1990.** Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple rings. *Internat. J. Food.Sci. Technol.*, n.25, p.576 - 582.
- **Biswal R.N. & Le Maguer M., 1989.** Mass transfer in plant material in contact with aqueous solution of ethanol and sodium chloride: equilibrium data. *J. Food Process Eng.*, n.11, p.159-176.
- **Bizot H., 1983.** Cité in Kechaou N., Kaalej M., Kapseau C., 1996. Approche empirique de la cinétique du séchage des dattes. *Science des aliments*, vol.16, p.593-606.
- **Bizot H., 1989.** Cité in Kechaou N., Bagane M., Kaalej M., Kapseau C., 1996. Approche empirique de la cinétique du séchage des dattes. *Science des aliments*, vol.16, p. 593-606.
- **Box George E.P., Draper Norman R., 1987.** «Empirical model-building and response surfaces». Ed. John Wiley and sons.

- **Blumenthal M., Stier F., 1997.** Optimization of deep-fat frying operations, *Trends Food Sci.tech.*, vol. 3 n.65, p.1126-1127.
- **Brunauer S., Emmett P. H., Teller E., 1938.** Adsorption of gases in multi molecular layers. *Journal of the American society*, p.1723-1732.

## C

- **Cao H. et al., 2006.** Optimization of osmotic dehydration of kiwifruit. *Drying Technol.*, n.24, p.89-94.
- **Castello M., Igual M., Fito P. & Chiralt A., 2009.** Influence of osmotic dehydration on texture, respiration and microbial stability of apple slices (var. 'Granny Smith'). *J. Food Eng.*, n.91, p.1-9.
- **Cheftel J.C., Cheftel H., 1977.** Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments. vol.1. Paris, Technique et documentation, 381p.
- **Chen C.C. et Morey R.V., 1989.** Comparison of Four ERH/EMC Equations, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, Vol. 32, n.3, p. 983 - 989.
- **Chenlo F., Moreira R., Fernandez-Herrero C. & Vazquez G., 2007.** Osmotic dehydration of chestnut with sucrose: mass transfer processes and global kinetics modelling. *J. Food Eng.*, n.78, p. 765-774.
- **Chessel D. et Dufour A.B., 2003.** Analyses de la variance, Biométrie et Biologie Evolutive - Université Lyon1, 30p.
- **Conway J., Castaigne R., Picard, G. et Voavn x., 1983.** Mass transfer considerations in the osmotic dehydration of apples. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, n.16, p.25-29.
- **Cornillon P., 2000.** Characterization of osmotic dehydrated apple by NMR and DSC. *Lebensm. Wiss. Technol.*, n.33, p. 261-267.
- **Corrêa J., Pereira L., Vieira G. & Hubinger M., 2010.** Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. *J. Food Process Eng.*, n.96, p. 498-504.
- **Corzo O. & Gomez E., 2003.** Optimization of osmotic dehydration of cantaloupe using desired function methodology. *J. Food Eng.*, n.64, p. 213-219.
- **Crank J. 1979.** The mathematics of diffusion. 2<sup>o</sup> edition, Clarendon Press, Oxford .

## D

- **Delort J, Laval, coord., 1981.** Sciences des aliments. Paris, Technique et documentation, in Association française de nutrition journée d'études « sciences des aliments », vol.2, n. hors série 2.
- **Dermesonlouoglou E.K., Pourgouri S. & Taoukis P.S., 2008.** Kinetic study of the effect of the osmotic dehydration pre-treatment to the shelf life of frozen cucumber. *Innovative Food Sci. Emerg. Technol.*, n.9, p. 542-549.
- **Derossi A., De Pilli T., Severini C. & McCarthy M.J., 2008.** Mass transfer during osmotic dehydration of apples. *J. Food Eng.*, n.86, p. 519-528.



- **Djouadi Farouk, 2012.** <http://maghrebemergent.com/economie/63-algerie/7787-la-pomme-de-terre-organique-algerienne-pourrait-conquerir-les-marches-europeens.html>
- **Do Amaral Sobral J.P., Lebert A. & Bimbenet J.J., 1999,** Isothermes de désorption de la pomme de terre entre 40 et 70 °C, Sciences des aliments, n.19, p.711-720.

## E

- **Eren I. & Kaymak-Ertekin F., 2007.** Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. *J. Food Eng.*, n.79, p. 344-352.
- **Espiard E., 2002.** Introduction à la transformation industrielle des fruits. Paris, Lavoisier-Tec & Doc.

## F

- **Falade K., Igbeka J. & Ayanwuyi F., 2007.** Kinetics of mass transfer and colour changes during osmotic dehydration of watermelon. *J. Food Eng.*, n.80, p. 979-985.
- **FAO, 1991.** *Racines, tubercules plantains et bananes dans la nutrition humaine*, Série FAO: Alimentation et nutrition.
- **FAOSTA, 2008.** <http://www.potato2008.org/fr/monde/index.html>
- **Fernandes F., Rodrigues S., Gaspareto O.C.P. & Oliveira E.L., 2006.** Optimization of osmotic dehydration of papaya followed by air-drying. *Food Res. Int.*, n.39, p. 492-498.
- **Fernandes F., Gallao M.I. & Rodrigues S., 2009.** Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissues structure during dehydration. *J. Food Eng.*, n.90, p. 186-190.
- **Ferrando M. & Spiess W., 2001.** Cellular of plant tissue during the osmotic treatment with sucrose, maltose and trehalose solutions. *J. Food Eng.*, n.49, p. 115-127.
- **Ferrari C. & Hubinger M., 2008.** Evaluation of the mechanical properties and diffusion coefficients of osmodehydrated melon cubes. *Int. J. Food Sci. Technol.*, n.43, p. 2065-2074.
- **Figen Kaymak-Ertekin, Atıl Gedik, 2003.** Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes. Department of Food Engineering, Engineering Faculty, Ege University, Gıda Muh. Bölümü, Bornova, 35100 ' Izmir, Turkey, n.37, p. 429-438.
- **Fito P., 1994.** Modelling of vacuum osmotic dehydration of food. *J. Food Eng.*, n.22, p. 313-328.
- **Fiwap, 2007.** Eric Somerhausen, *Acrylamide : Pomme de terre en danger ?*
- **FIWAP, 2011.** La production de plants dans le nord-ouest de l'Europe .
- **Floury J., Le Bail A. & Pham Q.T., 2008.** A three-dimensional numerical simulation of the osmotic dehydration of mango and effect of freezing on the mass transfer rates. *J. Food Eng.*, n.85, p. 1-11.

## G

- **García-Martínez, E.; Ruiz-Díaz, G.; Martínez-Monzó, J.; Camacho, M.M.; et. al., 2002.** Jam manufacture with osmodehydrated fruit. " Food Research International" ,v.35, p. 2-3.
- **García-Martínez E., Martínezmonzo J., Camacho M.M. & Martíneznavarrete N., 2002.** Characterisation of reused osmotic solution as ingredient in new product formulation. *Food Res. Int.*, n.35, p. 307-313.
- **García-Segovia P., Mognetti C., André-Bello A. & Martínez-Monzo J., 2010.** Osmotic dehydration of Aloe vera (*Aloea barbadensis* Miller). *J. Food Eng.*, n.97, p. 154-160.
- **Gaucher Isabelle, Lusson Julien, 2001.** La Pomme de terre et ses transformations. Génie Biologique Agro- Alimentaire. Industries Alimentaires et Biologique OQLF Office québécois de la langue française. *Croustille*, dans *Grand dictionnaire terminologique*.
- **Gertz C. 2000.** History of frying.3<sup>rd</sup> International Symposium on Deep Fat Frying, «Optimal operation», p.20-21.
- **Giraldo G., Talens P., Fito P. & Chiralt A., 2003.** Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic of mango. *J. Food Eng.*, n.58, p.33-43.
- **Girard J.P., coord., 1988.** Technologie de la viande et des produits carnés. Paris, Technique et documentation, 280Appliquées de Lyon, France.166p
- **Giroux F. & Marouzé C., 1994.** Étude de dispositifs permettant l'agitation des produits dans les procédés de déshydratation/imprégnation par immersion. *In : GFGP. Agitation et mélange en biotechnologies alimentaire et industrielle.* Paris, Lavoisier-Tec & Doc, p.29-34.
- **GNIS, 2011.** Catalogues européens des espèces de grandes cultures et plants de pomme de terre - Spunta.
- **Gogus F. & Maskan M., 1999,** Water adsorption and drying characteristics of okra (*Hibiscus Esculentus* L.), *Drying technology*, v.17,n.4-5, p.883-894.
- **Goupy J., 1999.** «Plans d'expérience pour surfaces de réponse».Ed Dunod.
- **Guilbot A., Lindenberg A.B., 1960.** Eau solvante et eau de sorption de la cellule de levure. *Biochem. Biophys. Acta*, n. 39, p. 389-397.

## H

- **Haverkort M. A.J. , van Loon M. C.D. et al., 2001.** <http://www.agricole1.com/les-processus-de-transformation-des-pommes-de-terre>.
- **Hawkes J. & Flink J.M., 1978.** Osmotic concentration of fruits slices prior to freeze dehydration. *J. Food Process. Preserv.*, n.2, p. 265-284.
- **Heng K., Guilbert S. & Cuq J.L., 1990.** Osmotic dehydration of papaya: influence of process variables on the product quality.*Sci. Aliments*, n.10, p.831-848.

## I

- **Islam M.N. & Flink J.M., 1982.** Dehydration of potato. 2. Osmotic concentration and its effects on air drying behaviour. *J. Food Technol.*, n.17, p. 387-403.
- **Iglesias H.G., Chirife J., 1982.** Water sorption parameters for food and food components. Handbook of Food isotherms, Academic Press, New York.
- **Iguedjal T., Louka N. Allaf K., 2008.** Sorption isotherms of potato slices dried and texturized by controlled sudden decompression. *Journal of Food Engineering* n.85, p.180–19.

## J

- **Jambrak A. et al., 2010.** Ultrasound effect on physical properties of corn starch. *Carbohydr. Polym.*, n.79, p. 91-100.
- **Javeri H., Toledo R. & Wicker L., 1991.** Vacuum infusion of citrus pectinmethylsterase and calcium effects on firmness of peaches. *J. Food Sci.*, n.56, p. 739-742.
- **Jena S. & Das H., 2004.** Modelling for moisture variation during osmo-concentration in apple and pineapple. *J. Food Eng.*, n.66, p. 425-432.
- **Jiokap Nono Y., Nuadjea G.B., Raoult Wack A.L. & Giroux F., 2001.** Comportement de certains fruits tropicaux traités par déshydratation-imprégnation par immersion dans une solution de saccharose. *Fruits*, n.56, p. 75-83.

## K

- **Kaymak-Ertekin et Gedik ,2004.** sur trois fruits (abricot, raisin et pomme) et la pomme de terre.
- **Kechaou N., Bagane M., Maalej M. & Kapseu C., 1996.** Approche empirique de la cinétique du séchage des dattes, *Sciences des aliments*, n.16, p. 593-606.
- **Kechaou N. & Maalej M., 1999,** Desorption isotherms of imported banana – Application of the GAB theory, *Drying technology*, vol.17,n. 6, p.1203-1213.
- **Khoyi M. & Hesari J., 2007.** Osmotic dehydration kinetics of apricot using sucrose solution. *J. Food Eng.*, n.78, p. 1355-1360.
- **Kiranoudis C.T., et al., 1993.** Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables, *Journal of Food Engineering*, vol.20, p.55-74.
- **Kouhila M., Belghit A. et Daguinet M., 1999.** ‘Approche Expérimentale des Isothermes de Sorption de la Menthe en Vue d’un Séchage par Energie Solaire’, *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 2, n°1, p. 61 – 68.
- **Kowalska H., Lenart A. & Leszczyk D., 2008.** The effect of blanching and freezing on osmotic dehydration of pumpkin. *J. Food Eng.*, n.86, p.p. 30-38.
- **Krokida M.K., Karathanos V.T. & Maroulis Z.B., 2000.** Effect of osmotic dehydration on colour and sorption characteristics of apple and banana. *Drying Technol.*, n.18, p. 937-950.

## L

- **Labuza T.P., Rey D. K., 1981.** Characterization of the effect of solutes on the water - binding and gel strength properties of carrageenan. *Journal of food science*, vol.46,n. 3, p.786-789.
- **Labuza T.P., Scaanane A., Chen J. Y., 1985.** Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods.*J.of food science*, vol.50,p. 385-391.
- **LeMaguer H. & Sharma S., 1997.** Design and selection of processing conditions of pilot scale contactor for continuous osmotic dehydration of carrots. *J. Food Process Eng.*, n.21, p.75-88.
- **Lenart A., Flink JM. 1984.** Osmotic concentration of potato-I: Criteria for the end of point of the osmosis process. *J Food Sci Technol*, n.19, p.45-48.
- **Lenart A., 1996.** Osmo-convective drying of fruits and vegetables: technology and application. *Drying Technol.*, n.14, p.391-413.
- **Lerica C.R., Pinnavaia T.G., Dalla Rosa M. & Bartolucci L., 1985.** Osmotic dehydration of fruit: influence of osmotic agents on drying behaviour and product quality. *J. Food Eng.*, n.50, p.1217-1226.
- **Lewicki and Lenart, 1995 P.** Lewicki and A. Lenart, *Osmotic dehydration of fruits and vegetables* (2nd ed.), *Handbook of industrial drying*, Marcel Decker, Inc., New York ,p.691-713.
- **Litchfield, J. B., et Okos, M. R. 1992.** Moisture diffusivity in pasta during drying. *Journal of Food Engineering*, n.17, p.117-142.
- **Loncin M., Weisser H., 1977.** Cité in Bandypadhyay S., Weisser H., Loncin M., 1980. Water adsorption isotherms of foods at high temperatures. *Lebensm-Wiss.u. Technology*, vol.13, p.182-185.
- **Lovedeep K, Narpinder S, Navdeep SS (2002).** Some properties of potatoes and their starches II. Morphological, rheological properties of starches. *Food Chem*, n.79, p.183-192.

## M

- **Madamba P. & Lopez R., 2002.** Optimization of the osmotic dehydration of mango (*Mangifera indica* L.) slices. *Drying Technol.*,n.20, p.1227-1242.
- **Makinson J.H.et al., 1987.** Fat uptake during deep-fat frying of coated and uncoated foods. *Journal of food composition and analysis*, n.1, p.93-101.
- **Manivannan P. and Rajasimman M., 2009.** Food Processing Laboratory, Department of Chemical Engineering, Annamalai University, Annamalai Nagar-608002, Tamil Nadu, India.
- **Marchal L., Allali H. & Vorobiev E., 2005.** Blanchiment de fraise par chauffage ohmique : incidence sur la cinétique de déshydratation-imprégnation par immersion. Paris, Lavoisier.
- **Marouéz C., Giroux F., Collignan A. & Rivier M., 2001.** Equipment design for osmotic treatments. *J. Food Eng.*, n.49, p. 207-221.

- **Matusek Anikó et MERÉSZ Péter, 2003.**Modelling of sugar transfer during osmotic dehydration of carrots. Department of Biochemistry and Food Technology Budapest University of Technology and Economics.
- **Mavroudis N.E., Dejmek P. & Sjöholm I., 2004.** Osmotic treatment induced cell death and osmotic processing kinetics of apples with characterised raw material properties. *J. Food Eng.*, n.63, p.47-56.
- **Mayor L., Pissarra J. & Sereno A., 2008.** Microstructural changes during osmotic dehydration of parenchymatic pumpkin tissue.*J. Food Eng.*, n.85, p.326-339.
- **Mbida Mindzie C., 2000.** L'aiélé (Canarium schweinfurthii Engl.) en Afrique centrale: histoire de la plante et les débuts de la domestication, pp. 67-78, In: C. Kapseu & G J. Kayem (Eds), Séminaire international sur le séchage et sur la valorisation du karité et de l'aiélé, Presses universitaires de Yaoundé, Cameroun.
- **McLaughlin, C. P., & Magee, T. R. A., 1998.** The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption for potatoes. *Journal of Food Engineering*, n.35, p.267–280.
- **McMinn, W. A. M., et Magee, T. R. A. 2003.** Thermodynamics properties of moisture sorption of potato. *Journal of Food Engineering*, n.60, p.157–165.
- **Menkov N.D., Paskalev H.M., Galyazkov D.I. et Kerezieva-Rakova M., 1999.** 'Applying the Linear Equation of Correlation of Brunauer-Emmet-Teller (BET)-Monolayer Moisture Content with Temperature', *Nahrung*, Vol. 43, n2, p. 118 – 121.
- **Montgomery DC. 2004.** Designs and analysis of experiments. John Wiley & Sons, New York.
- **Mossel D.A.A, Westerdijk J., 1949.** The physiology of microbial spoilage in foods. *Antonie Von Leeuwenhoek*, n. 15, p. 187-1 89.
- **Moyne C., 1985.**Etablissement des courbes caractéristiques et exploitation.Cahier de l'AFSIA, n.1, p.3-17.
- **Mujumdar A.S., 2006.** *Handbook of industrial drying*. 3<sup>rd</sup> ed. New York, USA: Taylor and Francis Group, LLC, p.688-700.
- **Multon J.L., 1982 .** Conservation et stockage des grains et graines et produits dérivés. Paris, Lavoisier, 425 p.
- **Myhara R., Taylor M. & Al-Bulushi I., 1996.** The moisture sorption isotherms of omani dates, *Drying*, n.96, p.989-996.

## N

- **Neumann H.J., 1972.** Dehydrated celery: effects of pre-drying treatment and rehydration procedures on reconstitution. *J. Food Sci.*, n.37, p.437-441.
- **Nieto A.B., Salvatori D.M., Castro M.A. & Alzamora S.M., 2004.** Structural changes in apple tissue during glucose and sucrose osmotic dehydration: shrinkage, porosity, density and microscopic features. *J. Food Eng.*, n.61, p.269-278.
- **Njoukam R., 1998.** L'arbre aux fruits noirs: l'aiélé, *Le Flamboyant*, n.46, p.1-15.
- **Noumi G.B., Ngameni E., Kapseu C. & Parmentier M., 2002.**Variation de la composition en acides gras et en triglycérides de l'huile des fruits de l'aiélé en fonction des conditions d'extraction et de la couleur du fruit. *La rivista italiana delle sostanze grasse*, n.79, p.315-318.

- **Nour C., 2002.** Mémoire de DEA, Université de Cheikh Anta Diop, Dakar.
- **Nourhène B., 2004.** Etude des migrations de l'eau et du chlorure de sodium dans des gels alimentaires Influence de la composition du gel et du procédé appliqué. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et alimentaires de Massy, 314p.
- **Nunes C. et al., 2008.** Effect of candying on microstructure and texture of plums (*Prunus domestica* L.). *Lebensm. Wiss. Technol.*, n.41, p.1776-1783.

## O

- **Ohkuma C. et al., 2008.** Glass transition properties of frozen and freeze-dried surimi products: effect of sugar and moisture on the glass transition temperature. *Food Hydrocolloids*, n.22, p.255-262.
- **OKLF (Office québécois de la langue française,)**, 2001. Croustille, dans Grand dictionnaire terminologique.
- **Ozdemir M., Ozen B., Dock L. & Floros J., 2008.** Optimization of osmotic dehydration of diced green peppers by response surface methodology. *Food Sci. Technol.*, n.41, p.2044-2050.

## P

- **Palipane, K. B., & Driscoll, R. H., 1992.** Moisture sorption characteristics of inshell macadamia nuts. *Journal of Food Engineering*, n.18, p.63-76.
- **Panades G. et al., 2008.** Mass transfer mechanisms occurring in osmotic dehydration of guava. *J. Food Eng.*, n.87, p.386-390.
- **Park K.J., Alonso L.F.T., Rodrigues R.A. & Scavroni C.M.S., 1996.** Desorption isotherms of red ginger (sho-ga): experimental determination and evaluation of mathematical models, *Drying*, n.96, p.1023-1028.
- **Petchi M. & Manivasagan R., 2009.** Optimization of osmotic dehydration of radish in salt solution using response surface methodology. *Int. J. Food Eng.*, v.5, n.3, DOI: 10.2202/1556-p.3758.1584.

## R

- **Raoult-Wack A.L., 1994.** Recent advances in the osmotic dehydration of foods. *Food Sci. Technol.*, n.5, p.255-260.
- **Rastogi N.K. & Raghavarao K.S.M.S., 2004.** Mass transfer during osmotic dehydration of pineapple: considering Fickian diffusion in cubical configuration. *Lebensm. Wiss. Technol.*, n.37, p.43-47.
- **Riggs P.D., Kinchesh P., Braden M. & Patel P.M., 2001.** Nuclear magnetic imaging of an osmotic water uptake and delivery process. *Biomaterials*, n.22, p.419-427.
- **Riva M. et al., 2005.** Structure property relationships in osmo-air-dehydrated apricot cubes. *Food Res. Int.*, n.38, p.533-542.

- **Rochamier T., 1993.** Influence des pétraitements et des conditions de séchage sur la couleur et l'arome de la menthe (*Mentha Spicata* Huds ) et de basilic (*Ocimum Basilicum*), thèse de doctorat, ENSLA de Massy ,133 p.

## S

- **Saravacos George D., 1995.** Mass transfer properties of foods, p.p. 169-221 Dans Engineering properties of foods par Rao M., Rizvi Marcel, Dekker S.S.H., INC, 2ème éd. 531p.
- **Saurel R., Raoult-Wack A.L. & Rios Guilbert S., 1995.** Approches technologiques nouvelles de la déshydratation-imprégnation par immersion (DII). *Ind. Aliment. Agric.*, n.2, p.7-13.
- **Scherrer B., 1984.** Comparaison des moyennes de plusieurs échantillons indépendants. *Tiré de "Biostatistiques". Gaëtan Morin Éditeur.* p. 422-463.
- **SCOTT W. J., 1953.** The water relations of *Staphylococcus aureus* at 30°C. *Aust. Bio I. Sci.*, n. 6, 549 p.
- **Shi X.Q., Chiralt, A., Fito P., Serra, J., Escoin , Gasque C., 1996.** Application of Osmotic Dehydration Technology on Jam Processing. *L. Drying Technology.* n.14 (3&4) p.841-847 .
- **Shi J., Le Maguer M., Wang S. & Liptay A., 1998.** Application of osmotic treatment in tomato processing effect of skin treatments on mass transfer in osmotic dehydration of tomatoes. *Food Res. Int.*, n.30, p.669-674.
- **Simal S. et al., 2001.** Water and salt diffusion during cheese ripening: effect of the external and internal resistances to mass transfer. *J. Food Eng.*, n.48, p.269-275.
- **Singh B., Panesar PS., Gupta AK., Kennedy JF., 2007.** Optimization of osmotic dehydration of carrot cubes in sucrose-salt solutions using response surface methodology. *Eur Food Res Technol* ,n.25, p.157-165.
- **Singh B., Panesar P. & Nanda V., 2008b.** Optimization of osmotic dehydration process of carrot cubes in sucrose solution. *J. Food Process Eng.*, n.31, p.1-20.
- **Singh C., Sharma H. & Sarkar B., 2008a.** Optimization of process conditions during dehydration of fresh pineapple. *J. Food Sci. Technol.-Mysore*, n.45, p.312-316.
- **Singh Jaspreet et al., 2009.** *Advances in potato chemistry and technology*, Academic Press, 508 p.
- **Souza J. et al., 2007.** Optimization of osmotic dehydration of tomatoes in a ternary system followed by air-drying. *J. Food Eng.*,n.83, p.501-509.
- **Sunjka P. & Raghavan G., 2004.** Assessment of pretreatment methods and osmotic dehydration for cranberries. *Can. Biosyst. Eng.*, n.46, p.335-340.

## T

- **Taiwo K.A., Angersbach A. & Knorr D., 2002.** Influence of high intensity electric field pulses and osmotic dehydration on the rehydration characteristics of apple slices at different temperatures. *J. Food Eng.*, n.52, p.185-192.

- **Talens P., Escriche I., Martínez-Navarrete N. & Chiralt A., 2003.** Influence of osmotic dehydration and freezing on the volatile profile of kiwi fruit. *Food Res. Int.*, n.36, p.635-642.
- **Taouti B., 2008.** Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de menthe verte (*Mentha viridis*). Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.166p.
- **Thebud R. & Santarius K.A., 1982.** Effects of high-temperature stress on various bio-membranes of leaf cells *in situ* and *in vitro*. *Plant Physiol.*, n.70, p.200-205.
- **Tortoe C., Orchard J., Beezer A. & O'Neil M., 2007.** Potential of calorimetry to study osmotic dehydration of food materials. *J. Food Eng.*, n.78, p.933-940.
- **Torreggiani D. & Bertolo G., 2001.** Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. *J. Food Eng.*, n.49, p.p.247-253.
- **Torreggiani D. et Bertolo G., 2004.** Present and future in process control and optimisation of osmotic dehydration. In Steve L. Taylor (Ed.), *Advanced in Food and Nutrition Research*, USA, vol.48, p.174-225.
- **Tsamis E., Maroulis Z.B., Marinou-Kouris D., Saravacos, 1990.** Heat of sorption water in dried fruits. *International of food science and technology*, vol.25, p. 350-359.

## U

- **Uddin M., Ainsworth P. & Ibanoglu S., 2004.** Evaluation of mass exchange during osmotic dehydration of carrots using response surface methodology. *J. Food Eng.*, n.65, p.473-477.

## V

- **Varoujan A. Yaylayan, Wnorowski Andrzej, and Perez Locas Carolina, 2003.** *Why Asparagine Needs Carbohydrates To Generate Acrylamide* [archive], , Department of Food Science and Agricultural Chemistry, McGill University, Québec, *J. Agric. Food Chem.*, vol.51, n.6, p. 1753–1757.
- **Vial C., Guilbert S. & Cuq J., 1990.** Osmotic dehydration of kiwi-fruits: influence of process variables on the colour and ascorbic acid content. *Sci. Aliments*, n.11, p.63-84.
- **Vijayanand P., Chand N. & Epieson W., 1995.** Optimization of osmotic dehydration of cauliflower. *J. Food Process. Preserv.*, n.19, p.229-242.
- **Vivier Stéphane, 2002.** Stratégie d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et Application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis. Thèse de doctorat. Ecole centrale de Lille, Université des sciences et technologies de Lille. 301p.

## W

- **Wang W.C. & Sastry S.K., 2000.** Effects of thermal and electrothermal pretreatments on hot air drying rate of vegetable tissue. *J. Food Process Eng.*, n.23, p.299-319.



- **Wu L. et al., 2009.** Applicability of vacuum-dehydrofreezing technique for the long-term preservation of fresh-cut eggplant: effects of process conditions on the quality attributes of the samples. *J. Food Process Eng.*, n. 91, p.560-565.

**Tableau n°28 :** Les principales maladies de la pomme de terre

(Bernhards, 1998 ; CIRED et GRET ,2002).

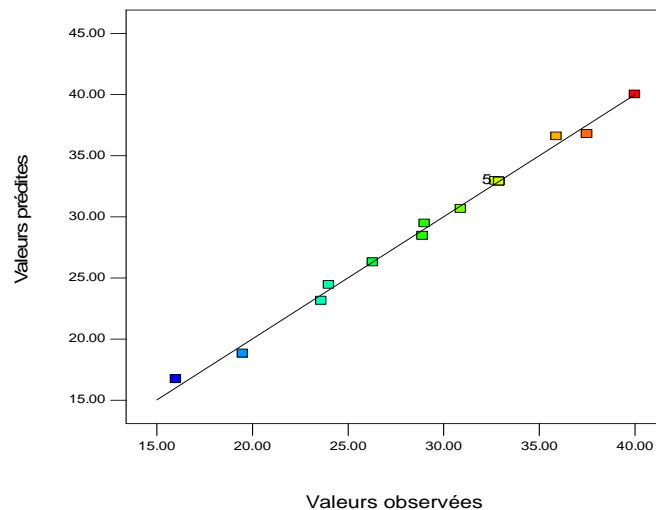
Les maladies	La cause	Les symptômes
Mildiou de la pomme de terre	Phytophthora infestant ce champignon se transmet par le vent	-Brunissement de la base des tiges ou de portions de tige et de pétioles -Taches jaunâtres devenant brunes sur les feuilles de la base
Virus X	Virus X .Ce virus transmet par frottement	Décoloration bénigne en forme de mosaïque légère entre les nervures.
Virus M	Virus M. Le vecteur de cette maladie sont les pucerons	-Faible décoloration des nervures, folioles apicales. - Légère coloration rougeâtre des feuilles terminales. -Une ondulation des bords et la formation de taches en mosaïque
Tache de rouille	Virus de la ratte	Une coupe des tubercules montre des tissus morts sous forme de tache rouge-brun
Cœur noir et Cœur creux	- Bactéries de pourriture apparaît à cause du manque d'O <sub>2</sub> - Le brusque passage de période sèche à période humide et vice-versa	Les tissus de tubercules montre une surface de tissus noirs.
Rhizoctone brun	Rhizoctonia. Maladie fongique.	Attaques sévères sur les tiges et les stolons et enroulement des feuille
Bactéries pathogènes du genre Erwinia.	Bactéries pathogènes du genre Erwinia, cette bactérie se transmet par la pluie, l'eau d'irrigation et les insectes.	La jambe noire (des nécroses de la base des tiges.).
Nématodes.	Globodera rostochiensis et Globodera pallida	Mauvaise croissance du végétal Nanisme
Puceron vert du p écher	Puceron vert du p écher	Déformation du limbe
PLRV (potato leafroll virus).	Virus d'enroulement de la pomme de terre causé par l'accumulation d'amidon qui rend les feuilles dures	Enroulement des feuilles. Le nanisme de la plante

**Tableau N°29 :** Variétés de pomme de terre

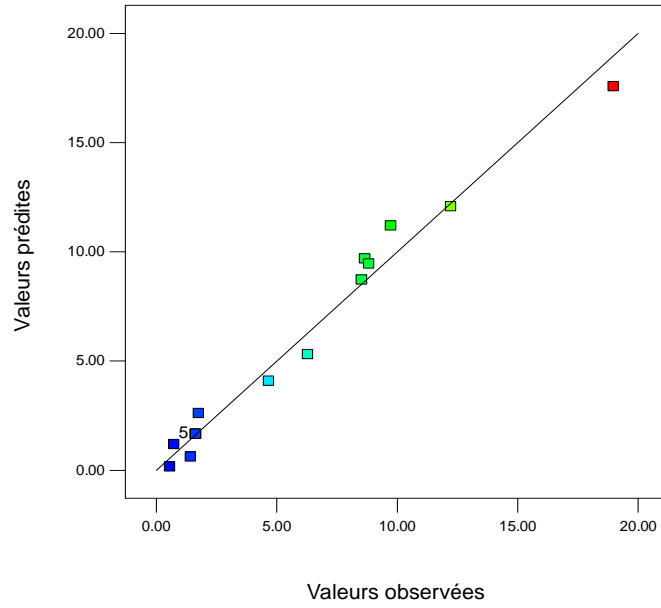
Variété	Durée de culture	Rendement	Conservation	Résistance au mildiou	Chair	Emploi en cuisine
'Adriana'	de 100 à 110 jours.	Très bon	Moyen	Moyen	Intermédiaire	Polyvalente.
'Amandine'	de 70 à 90 jours.	Assez bon	Médiocre	Médiocre	Ferme	vapeur, salades, etc.
'Apollo'	de 70 à 90 jours.	Bon	Médiocre	Bon	Ferme	vapeur, salades.
'Belle de Fontenay'	de 60 à 80 jours.	Très médiocre	Très médiocre	Mauvaise	Ferme	vapeur, salades.
'Bernadette'	de 90 à 110 jours.	Bon	Moyen	Assez bon	ferme.	vapeur, salades.
BF 15	de 80 à 100 jours.	Bon	Assez moyen	Moyen	ferme.	vapeur, salades.
'Bintje'	de 100 à 120 jours	Excellent	Assez bon	Moyen	Tendre	soupes, purées, frites.
'Charlotte'	de 100 à 120 jours.	Tres bon	Assez bon	Assez bon	assez ferme	Polyvalente
'Chérie'	de 100 à 110 jours.	Moyen	Moyen	Médiocre	Ferme	primeur, vapeur, salades.
'Corne de gatte'	de 120 à 140 jours.	Médiocre	Excellent	Médiocre	Ferme	vapeur, salades.
'Corolle'	de 100 à 110 jours.	Excellent	Moyen	Moyen	Ferme	vapeur, salades.
'Daisy'	de 100 à 120 jours.	Excellent	Bon	Moyen	Tendre	Frites, purées, soupes
'Désirée'	de 120 à 140 jours.	Excellent	Très bon	Très bon	Tendre	Frites, purées, soupes
'Élodie'	de 90 à 110 jours.	Excellent	Bon	Assez moyen	Intermédiaire	Polyvalente
'Galante'	de 90 à 110 jours.	Moyen	Médiocre	Très bon	Ferme	primeur, vapeur, salades.
'Juliette'	de 110 à 130 jours.	Moyen	Bon	Très bon	Ferme	primeur, vapeur, salades.
'Linzer Delikatess'	de 70 à 90 jours	Assez bon	Assez bon	Assez moyen	ferme.	primeur, vapeur, salades.
'Mona Lisa'	de 100 à 120 jours	Excellent	Assez bon	Bon	intermédiaire	polyvalente
'Nicola'	de 100 à 120 jours	Très bon	Bon	Moyen	Ferme	vapeur, salades
'Océania'	de 100 à 120 jours	Excellent	Assez bon	Moyen	intermédiaire	polyvalent
'Pompadour'	de 110 à 120 jours	Assez bon	Bon	Assez moyen	Ferme	vapeur, salades
'Ratte'	de 110 à 120 jours	Médiocre	Assez bon	Médiocre	Ferme	vapeur, salades
'Resy'	de 80 à 100 jours	Bon	Bon	très bon	Tendre	frites, purées, soupes

**Tableau N°29 :** Variétés de pomme de terre

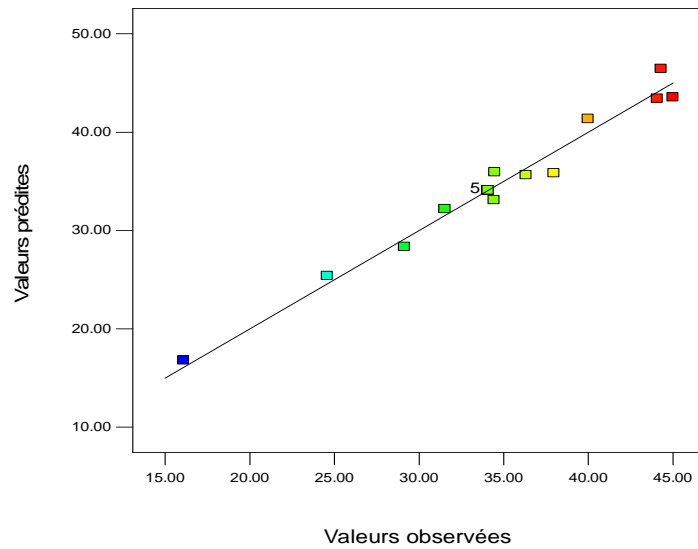
Variété	Durée de culture	Rendement	Conservation	Résistance au mildiou	Chair	Emploi en cuisine
'Rosabelle'	de 110 à 120 jours	Moyen	Moyen	Assez bon	Tendre	frites, purrées, soupes
'Rose de France'	de 110 à 120 jours	Très bon	Assez moyen	Médiocre	Ferme	primeur, vapeur, salades
'Roseval'	de 120 à 140 jours	Très bon	Bon	Médiocre	Ferme	primeur, vapeur, salades
'Safrane'	de 110 à 120 jours	Excellent	Moyen	Assez bon	tendre	frites, purrées, soupes
'Samba'	de 110 à 120 jours	Excellent	Bon	Bon	intermédiaire	polyvalente
'Sirtema'	de 80 à 90 jours	Bon	Très médiocre	Assez moyen	tendre	vapeur, salades en primeur, frites, purrées, soupes
'Spunta'	de 110 à 120 jours	Excellent	Assez moyen	Assez bon	tendre	frites, purrées, soupes



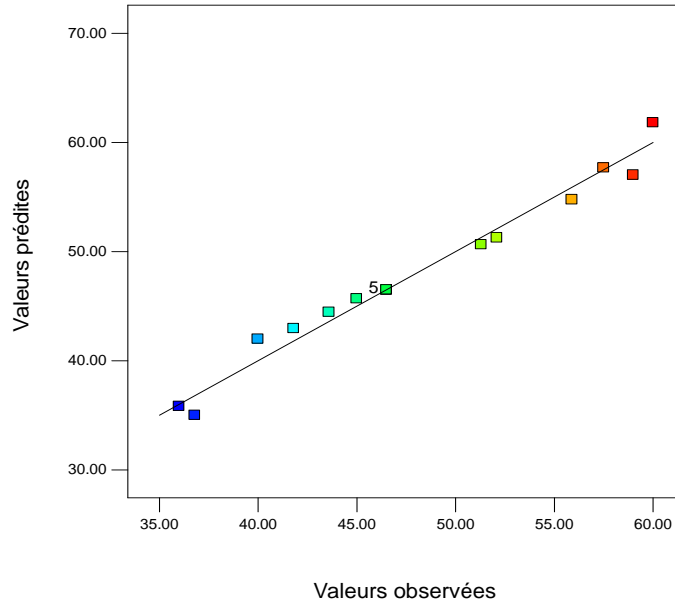
**Figure n°54 :** Représentation graphique des valeurs des pourcentages de la perte en poids prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des cubes de PDT dans une solution saline.



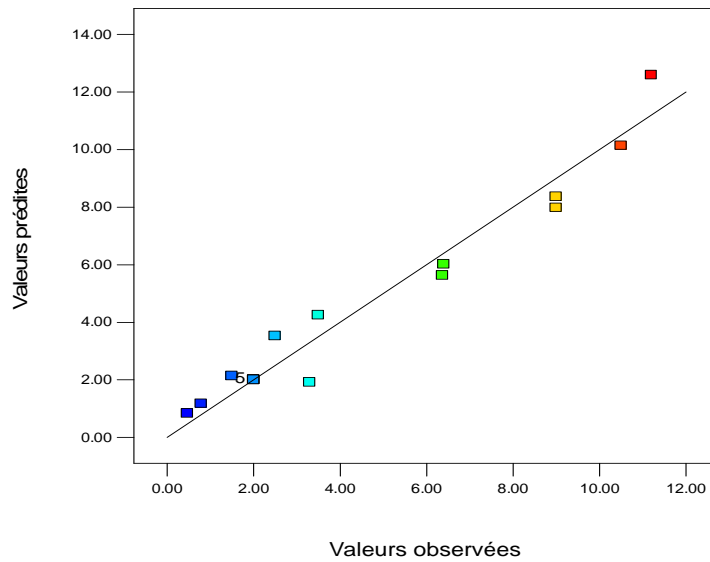
**Figure n°55 :** Représentation graphique des valeurs des pourcentages du GS prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des cubes de PDT dans une solution saline.



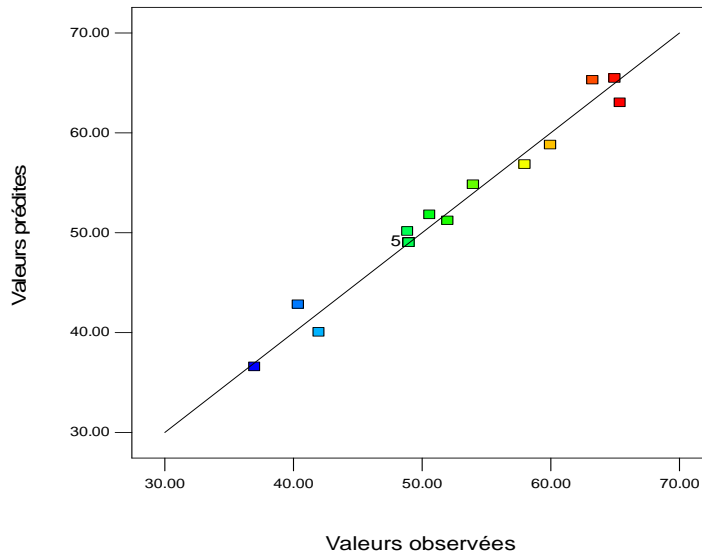
**Figure n°56 :** Représentation graphique des valeurs des pourcentages de la PE prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des cubes de PDT dans une solution saline.



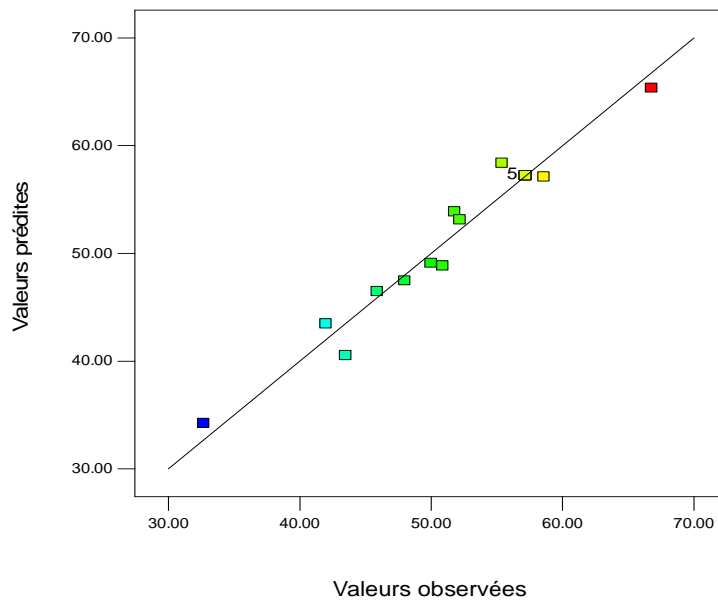
**Figure n°57 :** Représentation graphique des valeurs des pourcentages de la PP prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des cubes de PDT dans une solution de saccharose.



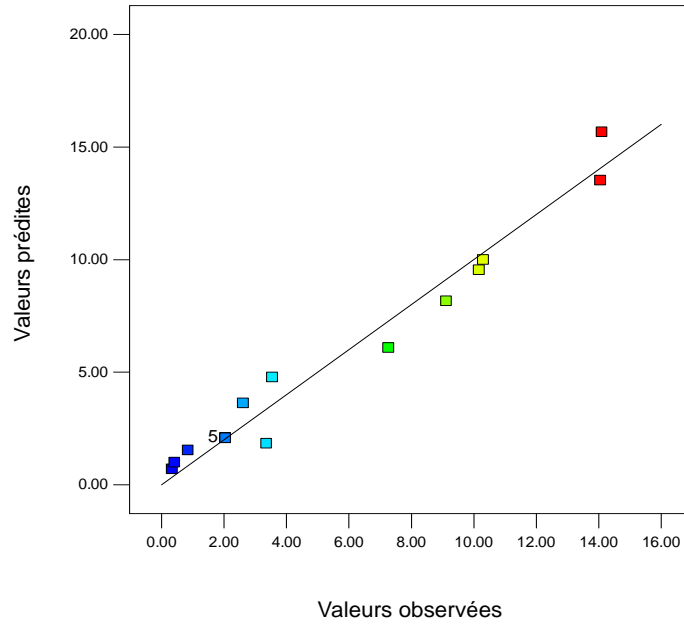
**Figure n°58 :** Représentation graphique des valeurs des pourcentages du GS prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des cubes de PDT dans une solution de saccharose.



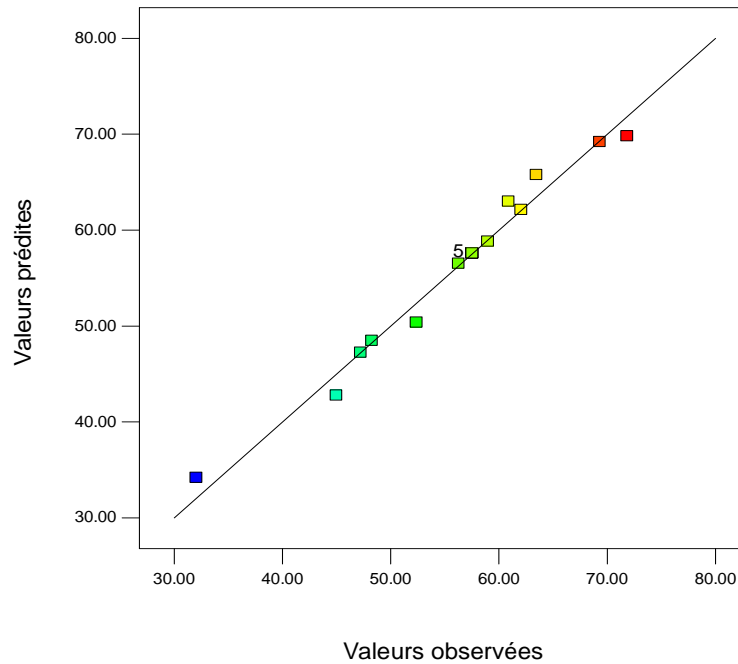
**Figure n°59 :** Représentation graphique des valeurs des pourcentages de la PE prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des cubes de PDT dans une solution de saccharose.



**Figure n°60 :** Représentation graphique des valeurs des pourcentages de la PP prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des rondelles de PDT dans une solution de saccharose.



**Figure n°61 :** Représentation graphique des valeurs des pourcentages du GS prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des rondelles de PDT dans une solution de saccharose.



**Figure n°62 :** Représentation graphique des valeurs des pourcentages de la PE prédites en fonction des valeurs observées lors de la déshydratation osmotique des rondelles de PDT dans une solution de saccharose.



## Résumé

La déshydratation osmotique partielle des cubes et des rondelles de pomme de terre, variété *Spunta*, a été réalisée à l'aide de deux solutions osmotiques : une solution de saccharose de concentration (40, 50 et 60°B) et une solution de NaCl de concentration (5, 10 et 15%). Les variables indépendantes de la déshydratation osmotique sont la température (20 – 60°C), la durée du traitement (80 -300 minutes), et la concentration de la solution osmotique. La méthodologie des surfaces de réponse a été utilisée pour l'optimisation de la déshydratation osmotique à l'aide du design expérimentale 8.0.6 Trial. Les conditions optimales pour les rondelles de pomme de terre sont : une température de 40°C, une concentration de 60° Brix et une durée de déshydratation de 300 min. Dans ces conditions le pourcentage de la perte en eau et le pourcentage du gain en solide sont respectivement de 69,34% (g/100 g poids initial) et 3,56%(g/100 g poids initial). Les isothermes de désorption de la pomme de terre ont été déterminés à deux températures 40 et 60°C. Le modèle mathématique de GAB a été utilisé pour la modélisation des isothermes. Les teneurs en eau de la couche monomoléculaire sont 11,5% et 8,94% obtenues respectivement à 40 et 60°C. L'utilisation des rondelles de pomme de terre préalablement déshydratées pour la préparation des chips a permis de réduire le temps de friture de 40,47% pour les chips sucrées et de 24,48% pour les chips salées.

**Mots-clés:** optimisation, déshydratation osmotique, pomme de terre, solution de sucre, solution de sel, méthodologie de surface de réponse, isotherme de désorption.

## Abstract

The osmotic dehydration partial cubes and slices of potato, variety *Spunta* was carried out using two osmotic solutions: a sucrose solution with a concentration of (40, 50 and 60 ° B) and a solution of NaCl with a concentration of (5, 10 and 15%). The independent variables are the osmotic dehydration temperature (20 - 60 ° C), the duration of treatment (80 -300 minutes), and the concentration of the osmotic solution. The response surface methodology was used to optimize the osmotic dehydration using the experimental design 8.0.6 Trial. The optimum conditions for the potato slices are: a temperature of 40 ° C, a concentration of 60 ° Brix and a dehydration time of 300 min. Under these conditions the percentage of water loss and solid gain percentage are respectively 69.34% (g/100 g initial weight) and 3.56% (g/100 g initial weight). Desorption isotherms of potato have been determined at two temperatures 40 and 60 ° C. The mathematical model of G.A.B has been used for modeling isotherms. The water content of the monolayer are 11.5% and 8.94% respectively obtained at 40 and 60°C. The use of potato slices dehydrated prior for the preparation of chips has reduced the time fried of 40.47% for sweet chips and 24.28% for salty chips.

**Keywords:** optimization, osmotic dehydration, potato, sugar solution, salt solution, response surface methodology, desorption isotherm.

ملخص:

تمت عملية التجفيف الحلوي الجزئي لمكعبات و شرائح للبطاطا، نوع سيونتا باستخدام نوعين من المحلول الأسموزي : محلول السكر (40 و 50 و 60° بر كس) و محلول NaCl بتركيز (5،10،15%). المتغيرات المستقلة للتجفيف الحلوي هي درجة الحرارة (20 - 60 ° م)، مدة العلاج (80-300 دقيقة) و تركيز المحلول الأسموزي. تم استخدام منهجية سطح الإستجابة لتحسين التجفيف الحلوي باستعمال التصميم التجريبي 8.0.6. من اجل شرائح البطاطا الشروط المحسنة هي : درجة حرارة 40° م، تركيز 60° بر كس و مدة تجفيف 300 دقيقة. في هذه الشروط ، نسبة فقدان الماء و نسبة ربح الصلب هما على التوالي : 69,34% (غ/100 غ الوزن الأصلي) و 3,56% (غ/100 غ الوزن الأصلي). تم تحديد الأيزو حراري للبطاطا وفق درجتي حرارة 40 و 60° م. تم استخدام النموذج الرياضي G.A.B من أجل نمذجة الأيزو حراري. محتويات الماء في الطبقة الأحادية هي 11,5% و 8,94% حصل عليها في 40° م و 60° م على التوالي. باستخدام شرائح البطاطا المحققة جزئيا مسبقا لتحضير رقائق البطاطا قد قلل من وقت القلي ب : 40,47% بالنسبة للرقائق الحلوة و 24,48% بالنسبة للرقائق المالحة.

**كلمات مفتاحية :** التحسين، التجفيف الحلوي، بطاطا، محلول السكر، محلول الملح، منهجية مساحة الإستجابة، الأيزو حراري.

