

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET

DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE KASDI-MERBAH OUARGLA



Faculté des sciences appliquées
Département de génie des procédés

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies.

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

Présenté par :

Firdaws REZKA

Kaoutar BOUKHALLAT

Thème :

**Utilisation le plan d'expérience de Box-Behnken
pour optimiser les différents facteurs influençant
sur le séchage de la pomme de terre**

Soutenu publiquement le : 17/06/2021

Devant le jury composé de :

Zaouia KENDOUR	MAA	Présidente	UKM Ouargla.
Djamel MENNOUCHE	MCA	Examineur	UKM Ouargla.
Mokhtar LATI	MCB	Rapporteur	UKM Ouargla.

Année universitaire : 2020/2021



Dédicace

*Par la grâce de Dieu Tout-Puissant, je dédie cet humble travail à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à mettre en œuvre ce mémorandum, et en particulier mes parents : **Ali et Bouhoreira Fatima** pour leur compréhension, leur soutien et leurs encouragements à me respecter.*

*Et mes frères **Elmouatazbillah , Zakaria et Salah Eddine.***

*Et mes sœurs **Asma , Halima , Louisa et Hadil.***

*Et la femme de mon frère **Bahia Belhechani.***

*Et mes cousines **Samira , Nacira et Soumia.***

*Et mes amis proches **Safa , Firdaws , Ikram , Maroua , Oumaima , Safa , Hana , Zahra , Siham , Biha , Noura , Roukia , aichouch , Fatna***

*Et ma **famille** proche, et tout le monde dans mon cœur et je n'ai pas mentionné son nom.*

Kaoutar



Dédicace

*Par la grâce de Dieu Tout-Puissant, je dédie cet humble travail à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à mettre en œuvre ce mémorandum, et en particulier mes parents : **Bouzgaget biaaMessouda**. pour leur compréhension, leur soutien et leurs encouragements à me respecter.*

*Et mon frère **Djamel eddine***

*Et mes sœurs **Amina ,Rihab,Rania,Mebaraka***

*Et la femme de mon frère **Kanouri farah***

*Et les fils de mes frères **Amdjed,Ilyes,Hidaya,Nour han***

*Et mon fiancé **Boussaidyounes** et son famille .*

*Et mes amis proches **Kaoutar,Souhaila ,Houda,Lamia,Fatima Zohra ,Ratiba ,Khaoula,Djouhaina, Rachda, Khadidja , Sendes***

*Et ma **famille** proche, et tout le monde dans mon cœur, et je n'ai pas mentionné son nom.*

Firdaws



Remerciment


.Nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné l'opportunité de terminer cet humble travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements mon encadreur monsieur LatiMoukhtar pour ses conseils, ses orientations et ses grands efforts tout au long de la période d'accomplissement cette mémoire.

Merci aux membres du jury qui ont bien voulu lire cette mémoire .

Nous ne pouvons pas non plus manquer de remercier tous les employés de l'Université Kasdi Merbah de Ouargla, en particulier le responsable des laboratoires de physique (Houti Ahmed).

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à faire ce travail.



Résumé :

Les principaux objectifs ont porté sur la détermination des conditions optimales du séchage de la pomme de terre par séchoir solaire. Trois paramètres opératoires ont été choisis : la température et la vitesse d'air asséchant et l'épaisseur de l'échantillon. Le plan d'expériences adopté est le plan de Box-Behnken.

Les conditions optimales pour le séchage de la pomme de terre sont les suivantes : Température de l'air est de 44 °C, vitesse de l'air est de 5 m/s, épaisseur des échantillons est de 0.5 cm. Dans ces conditions optimales, le temps de séchage peut atteindre la valeur minimale 365min, quant au changement de couleur atteindre la valeur $\Delta E = 15.26$

Mots-clés : Surfaces de Réponse, Séchage solaire ,Pomme de terre, Box-Behnken .

Abstract:

The main objectives were to determine the optimal conditions of drying potatoes using an indirect solar dryer. Three operating parameters were chosen: the air temperature ,the velocity and the sample thickness. Experimental design adopted is the Box-Behnken design.

The optimum conditions for drying the potato are as follows: Air temperature is 44 ° C, air velocity is 5 m / s, sample thickness is 0.5 cm . Under these optimal conditions, the drying time can reach the minimum value 256.78 min, as for the color change reach the value $\Delta E = 15.26$

Keywords: Response surfaces, Sun drying, Potato, Box-Behnken .

المخلص :

الأهداف الرئيسية لهذا العمل هي تحديد ظروف ال تمثلي لتجفيف البطاطس باستخدام مجفف شمسي . ثلاثة عوامل تم اختيارها و هي: درجة الحرارة وسرعة هواء التجفيف وسمك العينة . مخطط التجارب المعتمد هو مخطط بوكس بنكن .

الشروط المثلى لتجفيف البطاطس هي: درجة حرارة الهواء 44 درجة مئوية ، وسرعة الهواء 5 متر / ثانية ، و سماكة العينة 0,5 سم . في ظل هذه الظروف المثلى ، يمكن أن يصل وقت التجفيف إلى الحد الأدنى وهو 256.78 دقيقة ، أما بالنسبة لتغير اللون فيصل إلى القيمة $\Delta E = 15.26$

الكلمات المفتاحية: أسطح الاستجابة ، التجفيف الشمسي، البطاطس، بوكس بنكن .

Liste des tableaux

Numéro de	Désignation	Page
<i>Tableau .II.1</i>	Les quatre cultures alimentaires les plus importantes au niveau mondial en 2019.	07
<i>Tableau IV.1</i>	Domaine de variation des paramètres pour le plan de Box-Behnken ..	20
<i>Tableau IV.2</i>	Plan d'expériences en variable réelles et en variable codées.	21
<i>Tableau IV.3</i>	Plan d'expériences et résultats expérimentaux.	22
<i>Tableau IV.4</i>	Les valeurs des coefficients du modèle mathématique du temps de séchage	23
<i>Tableau VI.4</i>	Récapitulatif du modèle mathématique de temps de séchage	23
<i>Tableau IV.5</i>	Les valeurs des coefficients du modèle mathématique du changement de la couleur	24
<i>Tableau VI.5</i>	Récapitulatif du modèle mathématique du changement de la couleur	24
<i>Tableau VI.6</i>	Expérience de validation dans des conditions optimales: (T =44C ; V =5 m/s ; E =0.5 cm).	33

LISTE DES FIGURES

Numéro de figure	Désignation	Page
<i>Figure I.1</i>	Allure de séchage en fonction du temps.	05
<i>Figure I.2</i>	Différents types de séchoirs solaires	06
<i>Figure II.1</i>	Composition Chimique de la pomme de terre	09
Figure III. 1	Plan de Box-Behnken pour trois facteurs	14
<i>Figure IV.1</i>	Séchoir solaire indirect à convection forcée.	16
<i>Figure IV.2</i>	Tranches de Pomme de terre dans le claie.	18
<i>Figure IV.4</i>	Diagramme de Pareto des effets significatifs sur le changement de la couleur.	26
<i>Figure IV.5</i>	Graphiques des effets des principaux facteurs sur le temps de séchage et le changement de couleur	27
<i>Figure IV.6</i>	Profil d'interaction des facteurs agissant sur le temps de séchage	28
<i>Figure IV.7</i>	Profil d'interaction des facteurs agissant sur le changement de couleur.	28
<i>Figure IV.8</i>	(a,b et c) Surfaces de réponses du temps de séchage en fonction des trois couples de paramètres, Lors de chaque variation le 3 ^{ème} paramètre est maintenu à son niveau central "0"	30
<i>Figure IV.9</i>	(a,b et c). Surfaces de réponses du changement de la couleur en fonction des trois couples de paramètres, Lors de chaque variation le 3 ^{ème} paramètre est maintenu à son niveau central "0"	31
<i>Figure IV.10</i>	Surfaces des réponses des fonctions de désirabilité	34

LISTE DES ABREVIATIONS

Symbole	Désignations	Unités
ΔE	Changement de la couleur	/
FAOSTAT	Food and Agriculture Organisation STATique	/
E	Epaisseur de produit asséchée	cm
X	Facteurs	/
k	Nombre des facteurs	/
Y	Réponse	/
S	Surface d'échange	m ²
T	Température de l'air asséchant	°C
te	Temps de séchage	min
V	Vitesse de l'air asséchant	m/s
L	représente la clarté.	/
a	représente la composante chromatique (Rouge-Vert).	/
b	représente le composante chromatique (jaune-Bleu).	/

Table des matières

Dédicaces.....

Remerciement.....

Résumé.....

Liste des tableaux.....I

Liste des figures.....II

Liste des abréviationsIII

Liste des matièresIV

Introduction générale.....01

Chapitre I: Généralité sur le séchage

I.1.Introduction03

I.2. Définition de séchage.....03

I.3. Modes de séchage03

I. 3. 1. Séchage par conduction03

I. 3. 2. Séchage par convection03

I. 3. 3. Séchage par rayonnement04

I. 4. Avantages du séchage :04

I.5. Les facteurs qui influent sur le séchage04

I. 6.Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage04

I.6. 1. Influence de la température de l'air.....04

I.6. 2. Influence de la vitesse de l'air04

I.6. 3. Influence de l'humidité de l'air05

I.7. Différentes phases d'un séchage convectif05

I. 8. Différents types de séchoir solaire.....06

Chapitre II : Généralité sur la pomme de terre

II. 1. Introduction.....	07
II. 2. Origine de la pomme de terre.....	07
II. 3. La production et la consommation mondiale de la pomme de terre	07
II. 4. Evolution de la production nationale de la pomme de terre (2000-2019).....	08
II. 5. Valeur nutritionnelle et utilisation industrielle.....	08
II. 6. Les compositions chimiques.....	09
II.7. Importance économique :.....	09
II .7. 1. Place de la pomme de terre dans le monde.....	09
II .7. 2. Place de la pomme de terre en Algérie.....	09

Chapitre III: plans d'expériences

III.1. Introduction.....	11
III.2. les plans d'expériences.....	11
III. 2. 1. Définition.....	11
III.2. 2. Facteur.....	11
III.2. 3. Réponse	11
III.2. 4. Construction du plan d'expériences.....	11
III.3. Terminologie.....	12
III.3. 1. Domaine d'étude.....	12
III.3. 2. Méthodologie expérimentale	12
III.4. L'intérêt des plans d'expériences.....	12
III.5. Notation des plans factoriels fractionnaires	13
III.6. Plan de surface de réponse.	13
III.6.1 Plans composites centrés	13

III. 6.2 Plans de Box-Behnken	13
-------------------------------------	----

Chapitre IV : Partie expérimentale

IV.1.Introduction	15
IV. 2. Partie I : Matériels et méthodes	15
IV. 2. 1. Description du système de séchage (séchoir hybride)	15
IV. 2. 2. Fonctionnement du système de séchage	16
IV .2. 3. Protocole expérimentale et méthodologie de travail	17
IV. 2. 4. Colorimètre CHROMA METER CR-400	18
IV. 3. Parti II Résultats et discussion	20
IV. 3.1.Domaine de variation des paramètres pour le plan de Box-Behnken	20
IV. 3. 2. Réponses étudiées	21
IV. 3. 3. Analyse du modèle	22
IV .4.Analyses de variance (ANOVA).....	25
IV .5.Analyse des surfaces de réponses	29
IV.6.Optimisation des paramètres	32
Conclusion générale.....	35
Références bibliographique.....	



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le séchage constitue l'un des principaux moyens de conservation des denrées alimentaires périssables. En effet, en éliminant l'eau (BOUBEGHAL,2007), on inhibe l'action des germes microbiens (levures, moisissures, bactéries) responsables du pourrissement. C'est aussi une étape nécessaire dans la congélation de certains produits, car l'élimination de l'eau diminue leur poids et leur volume. En résumé, le séchage permet d'améliorer la conservation des produits, de faciliter leur transport, de réduire les risques de pertes de produits après récolte et surtout d'élargir la commercialisation de ces produits en les rendant disponibles toute l'année(BOULEMTAFES,2011).

L'une des applications du séchage solaire est le séchage des produits agricoles comme les légumes et les fruits. L'utilisation des produits séchés est très variée, les morceaux de légumes peuvent être utilisés pour entrer dans la composition de potages ou de poudres pour formuler des sauces. Parmi ces produits agricoles séchés on peut citer la pomme de terre.

Quand on cherche à comprendre comment influencent les différents paramètres (Température, Vitesse de l'air asséchant et épaisseur de tranche de la pomme de terre) sur le temps de séchage et changement de couleur, il est fréquent de recourir à une méthode classique qui fait varier un seul facteur à la fois. Cette méthode traditionnelle, appelée essais-erreurs, est imprécise et exige un nombre élevé d'essais. Elle ne permet pas d'atteindre l'optimum réel car l'interaction entre les variables n'est pas prise en considération. Une méthode plus fiable et plus robuste fait appel à l'analyse statistique et aux plans d'expériences.

Les plans d'expériences sont des techniques qui permettent de quantifier les effets de divers facteurs sur une réponse et de les optimiser dans des domaines expérimentaux bien déterminés. On organise une suite d'essais consistant à manipuler les facteurs afin de décrire la méthode permettant d'obtenir la réponse optimale. La méthodologie de surface de réponse (RSM) fait partie des plans d'expériences utilisés pour l'optimisation. C'est une modélisation empirique technique consacrée à l'évaluation de la relation d'un ensemble de facteurs expérimentaux contrôlés et observés avec les résultats(FADIL,2015).

Dans ce travail, nous proposons une méthode d'optimisation permettant de déterminer les modèles mathématiques du séchage de la pomme de terre en appliquant le plan de Box Behnken à 15 essais. Ces modèles permettant de mettre en évidence la relation entre les trois

paramètres opératoires : la température de séchage, la vitesse d'air asséchant et l'épaisseur des échantillons et les réponses étudiées (le temps de séchage et le changement de la couleur).

Cette mémoire s'articule autour des quatre parties suivantes:

- Le premier chapitre présente de généralité sur le séchage.
- Un ensemble de connaissances sur la pomme de terre : origine, la plante, production et composition chimique sont illustrés dans le deuxième chapitre.
- Dans le troisième chapitre présente le plan utilisé (plan d'expérience).
- Le quatrième chapitre est consacré aux essais expérimentaux, résultats trouvés et la technique des plans expérimentaux.
- Enfin nous avons terminé notre travail par une conclusion générale.



CHAPITRE I
GENERALITE SUR LE
SECHAGE

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LE SECHAGE**I.1. Introduction :**

Le séchage est une opération importante dans le domaine agro-alimentaire et industriel, il consiste à éliminer totalement ou partiellement l'eau d'un produit humide.

Le séchage direct au soleil est la méthode la plus utilisée dans la plupart des pays en voie de développement, pour préserver les produits agro-alimentaires (MENNOUCHE,2006).

I.2. Définition de séchage :

Le séchage est une opération unitaire qui consiste à éliminer tout ou partie d'un solvant (très souvent l'eau) contenu à l'intérieur d'un corps humide (solide ou liquide). Le produit final obtenu étant toujours un solide. En pratique, de nombreux produits alimentaires et biologiques subissent des opérations de séchage lors de leur transformation et / ou de leur conservation(BERREBEUH,2009).

I.3. Modes de séchage :On distingue trois modes différents de séchage :

I. 3. 1. Séchage par conduction :

Dans ce mode de séchage, L'énergie thermique nécessaire au séchage est apportée non pas par un gaz en mouvement autour du produit à sécher, mais par contact direct entre le produit et une paroi chauffée. (GHAZZOUL et RACHDI,2020).

I .3. 2. Séchage par convection : (SEBBAGH et CHERFAOUI,2017).

Dans le séchage industriel, il s'agit probablement du mode de séchage le plus courant. Il consiste à mettre en contact, un gaz (air) s'écoulant en régime généralement turbulent, autour du corps à sécher, qui peut se présenter sous forme de particules, de gouttelettes, de fibre ou de plaques. Pour un séchage par convection, les échanges de chaleur et de masse entre le produit à sécher et l'air de séchage sont déterminés par les coefficients de transfert à la ..surface, qui dépendent des caractéristiques de l'air (vitesse, température, humidité).

En régime convectif, la chaleur est directement transportée par un fluide caloporteur, qui emmagasine la chaleur (air chaud, vapeur, eau, etc.). La convection est un mode de transfert rapide .

Il existe deux types de convection :

- **Convection forcée.**
- **Convection naturelle.**

I.3.3. Séchage par rayonnement :

Dans ce mode de séchage, l'énergie nécessaire à l'évaporation est transmise par rayonnement. Ce procédé de séchage est très efficace pour l'élimination de l'eau, surtout lorsque le produit à sécher n'est pas thermosensible.(BEKAKRA et KHERFI,2017).

I. 4. Avantages du séchage :Les principaux avantages du séchage sont:
(NGUYEN,2015).

- Une durée de conservation des aliments déshydratés qui peut être de plusieurs mois.
- La désactivation des enzymes responsables de la dégradation des aliments.
- L'inhibition de la croissance des micro-organismes grâce à la réduction de l'activité d'eau.

I.5. Les facteurs qui influent sur le séchage :Les paramètres affectent sur le séchage sont : (ALBITAR,2010).

- La nature du produit (sensibilité à la chaleur, sa composition et sa teneur initiale en humidité... mais également sa forme, etc.).
- Les caractéristiques de l'air (température, vitesse, humidité).

I. 6.Influence des paramètres de l'air sur la cinétique de séchage :

On distingue plusieurs d'influence des paramètres de l'air :

I.6. 1. Influence de la température de l'air :

La température de l'air asséchant influe considérablement sur la vitesse de séchage. Cette influence est due à l'apport de chaleur au produit qui croît avec la température de l'air.

Elle est aussi à la température du produit qui est d'autant plus importante que la température de l'air élevée.(MISSOUM,2016).

I.6. 2. Influence de la vitesse de l'air :

On appelle la vitesse de séchage, la masse d'eau évaporée par unité de temps et par unité de surface d'évaporation du matériau .

La vitesse de séchage est fonction de très nombreux paramètres dont les plus importants sont :

- La nature, la porosité, la forme et l'humidité du produit.
- La température, l'humidité et la vitesse de l'air sécheur (RAMDANI et HADDOUCHE,2020) .

I.6. 3. Influence de l'humidité de l'air :

La teneur en eau de l'air, joue un rôle important sur le comportement des cinétiques de séchage de certains produits. De même que pour la vitesse de l'air, cette influence est plus importante au début de séchage et diminue lorsque la température de l'air augmente. (HOUHOU,2012).

I.7. Différentes phases d'un séchage convectif :

Tous les travaux de séchage montrent que ces courbes se distinguent suivant la nature du produit. Mais d'une manière générale, on constate l'existence de trois différentes périodes qui se caractérisent par un comportement différent de la vitesse de séchage :

Si dans une opération de séchage on procède à la mesure de la masse du produit à intervalles réguliers, on obtiendra ce qu'on appelle courbe de la vitesse de séchage. Sur cette courbe (figureI.1)on distingue trois régions explicitées comme suit :(BERREBEUH,2009).

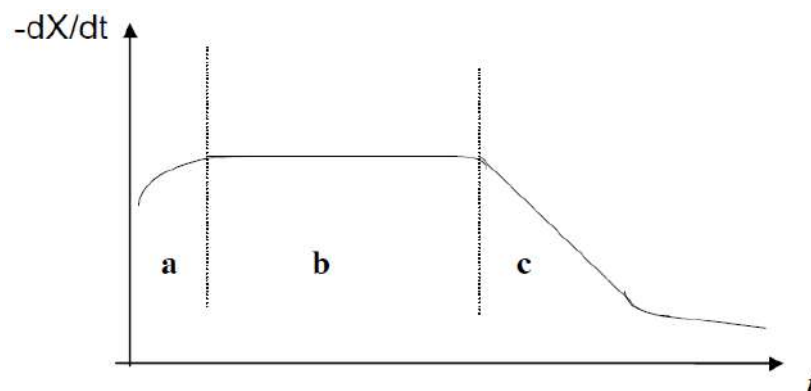


Figure I. 1 : Allure de séchage en fonction du temps.

Où,

- phase 0 : Période de mise en température (a).
- phase I: Période à allure constante (b).
- Phase II: Période de ralentissement (c).

I. 8. Différents types de séchoir solaire

Il existe une très grande diversité de type de séchoirs développés pour servir les divers buts de sécher des produits agro-alimentaires selon le besoin local et la disponibilité. Généralement, on peut classer les séchoirs solaires selon le mode de chauffage ou le mode de leur fonctionnement en séchoirs directs, séchoirs indirects, séchoirs mixtes et séchoirs hybrides (MECHERI et KOUICI, 2019).

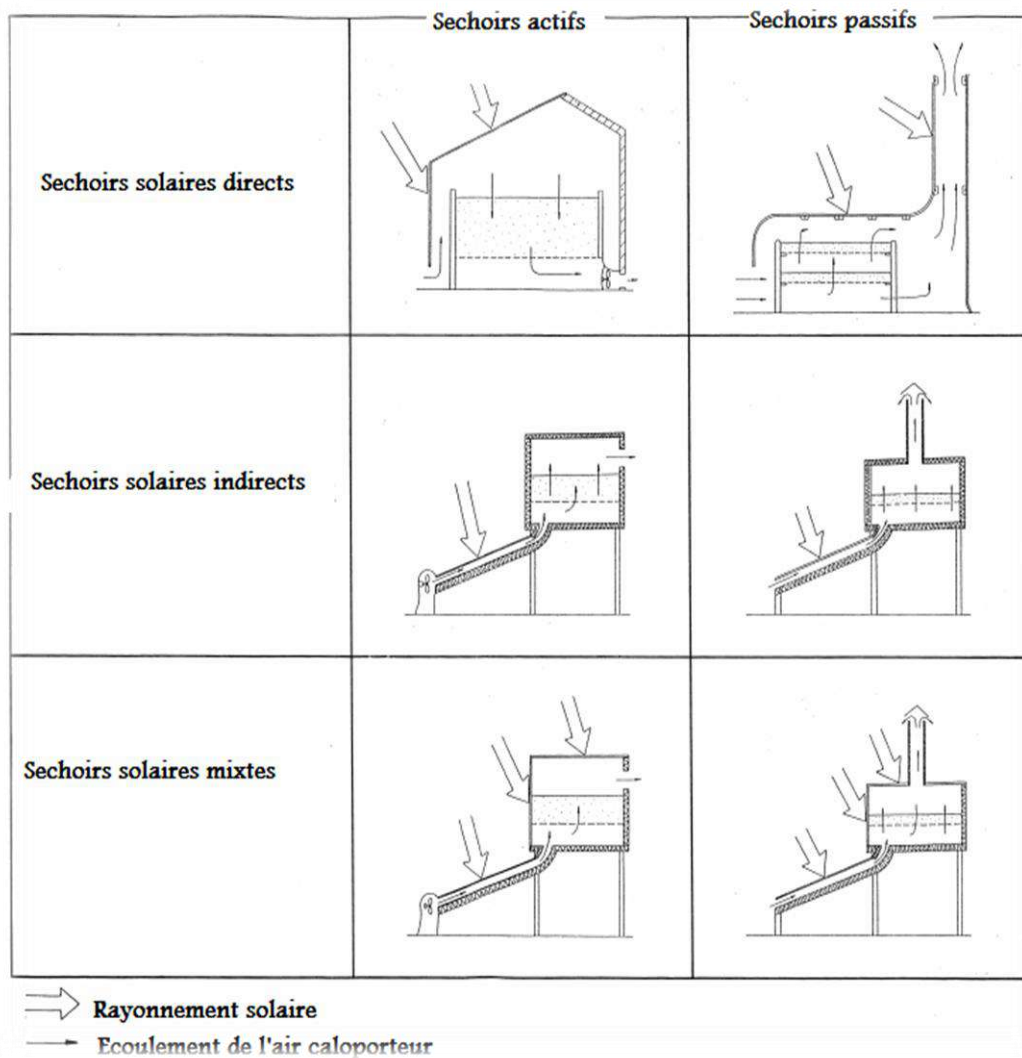


Figure I. 2 Différents types de séchoir solaire



CHAPITRE II
GENERALITE SUR LA
POMME DE TERRE

CHAPITRE II : GENERALITE SUR LA POMME DE TERRE

II. 1. Introduction

La pomme de terre, *Solanum tuberosum* L., est parmi les quatre cultures alimentaires les plus importantes au niveau mondial après le riz et le maïs et le blé.(FAOSTAT,2019).

Tableau II.1.Les quatre cultures alimentaires les plus importantes au niveau mondial en 2019.

Le produit	Production (tonnes)
Riz	1259374825
Maïs	1156787176
Blé	765769635
Pomme de terre	370436581

Originnaire des Andes sud-américaines, la Spunta est la pomme de terre la plus cultivée au monde. La Spunta, qui s'adapte à tous les climats.

II. 2.Origine de la pomme de terre

La pomme de terre constitue une des premières ressources alimentaires au monde. Cette espèce végétale dont l'origine se trouve dans la Cordillère des andes s'est propagée à travers tous les continents sans exception. 370 millions de tonnes de pomme de terre sont produites sur notre planète cultivée dans plus de 150 pays.(FAOSTAT ,2019).

II. 3. La production et la consommation mondiale de la pomme de terre

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 161,5 millions de tonnes environ a dépassé celle du monde développé 155,9 millions de tonnes.

Les pays de grandes surfaces récoltées et de grandes quantités consommables de la pomme de terre sont l'Asie et l'Océanie et l'Europe avec des grandes quantités mais le rendement de production le plus élevé est de l'Amérique du Nord de 41,2 tonnes/ha, par contre la quantité de consommation de pomme de terre en Kg par habitant est élevée dans l'Europe et l'Amérique du Nord.(DJAAFOUR,2019).

II. 4. Evolution de la production nationale de la pomme de terre (2000-2019)

La production a augmenté entre les années 2000 et 2019 passant approximativement de 1,2 million de tonne de à plus de 5 millions de tonnes .

Selon le rapport de la FAOSTAT en 2019, la production de la pomme de terre a une dynamique de croissance intéressante est aussi très significative, la production a évolué entre 2,1 millions de tonnes en 2005 à 3,3 millions de tonnes en 2010, et de 4,5 millions de tonnes en 2015 à 5 millions de tonnes en 2019.

II. 5.Valeur nutritionnelle et utilisation industrielle

La pomme de terre est un aliment riche en glucide et pauvre en lipide, elle présente des niveaux significatifs de vitamines B. C'est également une source de minéraux, avec une prédominance du potassium, du fer et en zinc.

La pomme de terre est aussi utilisée par voies biotechnologiques dans la production des vaccins contre le diabète et l'hépatite.

Le tubercule de pomme de terre présente une multi-utilisation, constitue un organe de reproduction, et aussi une matière première pour la transformation industrielle.

L'utilisation de la pomme de terre en industrie est un outil de régulation et de valorisation des produits ainsi que de la création d'emplois.

Parmi les créneaux liés à la transformation, on peut citer : fabrication des féculs à base de pomme de terre, fabrication des pommes de terre précuites, fabrication des frites surgelées et la production des chips. En Algérie, sauf les deux derniers qui sont plus au moins développés, encore avec beaucoup de lacunes.(KHENDOUDI,2016).

II. 6. Les compositions chimiques

La pomme de terre est un légume fort nutritif, sa teneur en eau est de l'ordre de 78%. Les glucides surtout constitués d'amidon, représentent 15% à 20%. Les protéines ne se présentent qu'à un taux de 1% à 2%. Il n'existe que des traces de lipides, les vitamines B1, B2, et C localisées au niveau de la pelure. : (LAMARA,2015).

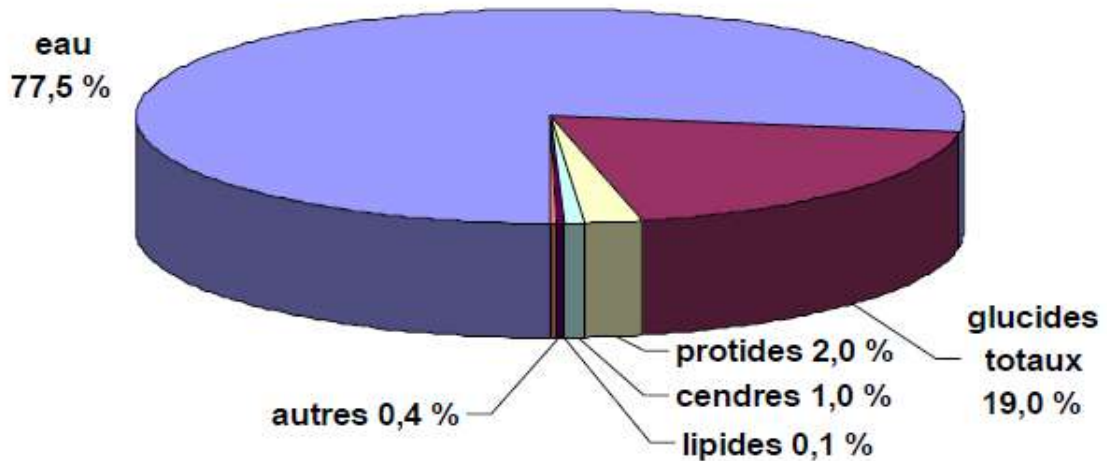


Figure II. 1: Composition chimique de la pomme de terre

II.7. Importance économique :

On distingue son importance mondiale et nationale

II .7. 1. Place de la pomme de terre dans le monde

La pomme de terre occupe une place importante dans l'économie mondiale. La consommation de la pomme de terre reflète l'importance qui lui est accordée dans l'alimentation des populations de nombreux pays .

II .7. 2. Place de la pomme de terre en Algérie

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. Après que *Solanum tuberosum* L. fut introduite en Algérie au milieu XVIème siècle, l'essentiel de la production était expédié en France. En 1962, lorsque le pays acquit son indépendance, il produisait

250000 tonnes et en exportait environ le tiers. Depuis, la pomme de terre est devenue une des principales cultures destinées à la consommation domestique.

En 2019, l'Algérie a occupé la quatrième place, dans la production de la pomme de terre en Afrique. La production nationale durant la décennie (2017-2019) a augmenté de 4,6 millions de tonnes en 2017 à 5 millions de tonnes en 2019. La surface cultivée a augmenté de 148822 hectares en 2017 à 157864 hectares en 2019, selon **(FAOSTAT)**. Malgré cette nette augmentation des rendements, la production nationale n'arrive pas à satisfaire les besoins nationaux en semence de pomme de terre. Rappelons que 80% des besoins en semences proviennent de l'importation.(FAOSTAT).



CHAPITRE III
PLANS D'EXPERIENCES

CHAPITRE III :PLANS D'EXPERIENCES**III.1. Introduction**

Le terme “ **plans d'expériences**” vient de l'anglais “Design of Experiments” qui se traduit par “conception des expériences”.

Les plans d'expériences constituent « un essai technologique d'utilisation maximale des données » (CHEKROUNE,2008).

III.2. les plans d'expériences**III. 2. 1. Définition**

Un plan d'expérience constitue une stratégie de planification d'expériences afin d'obtenir des conclusions solides et adéquates de manières efficaces et économique. La méthodologie des plans d'expériences est basée sur le fait qu'une expérience convenablement organisée, conduira fréquemment à une analyse et à une interprétation statistique relativement simple des résultats. (BELKADI et MAKKED,2016).

III.2. 2. Facteur

Les variables que l'on désire étudier sont appelées facteurs. En général, un facteur varie entre deux bornes : la borne inférieure et la borne supérieure. Dans le langage des plans, on dit que le facteur varie entre le niveau bas (borne inférieure que l'on note souvent par -1) et le niveau haut (borne supérieure que souvent notée par +1).(TOUATI,2019).

III.2. 3. Réponse

La réponse est la grandeur mesurée à chaque essai ; le plan vise à déterminer les facteurs influençant ou l'évolution de l'influence en fonction de ceux-ci. Cette grandeur est souvent mesurable comme la résistance à la compression, l'affaissement et l'air occlus mais elle peut également être qualitative, par exemple une appréciation visuelle sur l'état d'une surface .(BELGHARBI et ABIB ,2016).

III.2. 4. Construction du plan d'expériences

La construction d'un plan d'expériences pour l'étude des effets des facteurs peut s'appuyer sur deux grandes familles de critères :

- Les critères d'orthogonalité, la construction des plans se fait à partir de règles combinatoires.
- Les critères d'optimalité, la construction des plans se fait à partir de règles algorithmiques(MEGHACHOU,2014).

III.3. Terminologie

La grandeur d'intérêt, qui est généralement notée y , porte le nom de *réponse*. Les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées *facteurs*. On parle donc des facteurs qui influent sur une réponse. Les termes *facteur* et *réponse* sont universellement employés dans le domaine des plans d'expériences.(TOUATI,2019).

III.3. 1. Domaine d'étude

Dans la pratique, l'expérimentateur sélectionne une partie de l'espace expérimental pour réaliser son étude. Cette zone particulière de l'espace expérimental est le *domaine d'étude*. Ce domaine est défini par les niveaux hauts et les niveaux bas de tous les facteurs et éventuellement par des contraintes entre les facteurs. (GOUPY,2006).

III.3. 2. Méthodologie expérimentale

La démarche à respecter est la suivante :

- Définition de l'objectif.
- Choix des réponses expérimentales.
- Choix des facteurs et du domaine expérimental d'intérêt.
- Etablir la stratégie expérimentale.
- Construction de la matrice d'expériences.
- Construction du plan d'expérimentation.
- Expérimentation.
- Calcul des estimations des informations recherchées.
- Interprétation des résultats.(BELKADI et MAKKED,2016).

III.4. L'intérêt des plans d'expériences

L'intérêt majeur des plans d'expérience réside dans le fait qu'ils permettent d'optimiser le nombre d'expérimentations à réaliser lors de la phase d'essais, en déterminant au préalable les réels facteurs ou combinaisons de facteurs influents sur la réponse du système à étudier.(BELKADI et MAKKED,2016).

III.5. Notation des plans factoriels fractionnaires

Pour k facteurs prenant deux niveaux le plan complet est noté 2^k

Le plan fractionnaire, moitié du plan complet, a ou $\frac{1}{2} 2^k$ ou 2^{k-1} essais.

On peut donner une signification à chaque caractère de cette notation :

- le k signifie qu'il y a k facteurs étudiés
- le 2 signifie que chaque facteur prend deux niveaux
- le 1 signifie que le nombre d'essais du plan a été divisé par 2.

Un plan 2^{k-q} permet d'étudier k facteurs prenant chacun deux niveaux. Le plan complet a été divisé par 2^q . (MILOUD,2019).

III.6. Plan de surface de réponse

Un plan de surface de réponse est un ensemble de techniques de plan d'expériences qui vous permettent de mieux comprendre et d'optimiser votre réponse.

Il existe deux principaux types de plans de surface de réponse :

III.6.1. Plans composites centrés

Les plans composites centrés comprennent un plan factoriel ou un plan factoriel fractionnaire avec des points centraux, auxquels s'ajoute un groupe de points axiaux qui permettent d'estimer la courbure. (<https://support.minitab.com>)

III.6.2. Plans de Box-Behnken

Box et Behnken (1960) ont introduit un type différent de plans d'expériences pour les modèles du deuxième ordre qui permettent l'estimation de certaines interactions.

Comme les plans de Box-Behnken comportent moins de points, leur coût est moindre que celui des plans composites centrés pour le même nombre de facteurs.

Un plan de Box-Behnken est un type de plan de surface de réponse qui ne contient pas un plan factoriel fractionnaire ou un plan factoriel fractionnaire.

Les plans de Box-Behnken pour 3 facteurs impliquent trois blocs, dans chacun, un plan factoriel 2^2 qui est représenté par chaque paire de traitement pendant que le troisième facteur reste fixé à 0. Donc le plan de Box-Behnken de 3 facteurs possède 15 essais (12 arêtes et 3 points au centre-Figure III. 1)

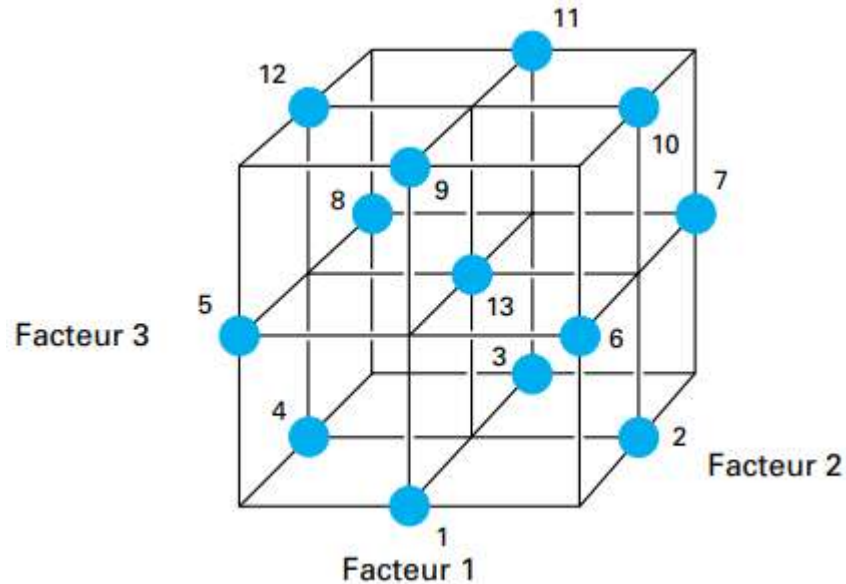


Figure III. 1: Plan de Box-Behnken pour trois facteurs

III.6.2.a. Propriétés des plans de Box-Behnken

Les plans de Box-Behnken possèdent les propriétés suivantes :

- Ils nécessitent 3 niveaux pour chacun des facteurs ; -1 , 0 et $+1$ pour assurer la condition d'orthogonalité.
- Ils possèdent la propriété de séquentialité
- Les erreurs de prédiction sur les réponses calculées sont plus faibles que les erreurs expérimentales. (KIMOUCHE ,2008).



Chapitre IV

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE IV : PARTIE EXPERIMENTALE**IV.1.Introduction**

L'étude a évalué l'effet de la température, de la vitesse de l'air et de l'épaisseur du produit séché sur le temps de séchage et le changement de couleur ΔE . Utiliser un séchoir solaire à convection forcée indirecte conçu et réalisé par l'équipe Stockage d'énergie du Laboratoire de Développement des Energies Nouvelles et Renouvelables en Zones Sèches (LENREZA), Université de Ouargla (31°57' N, 5°20'E), Algérie, à la Faculté de Mathématiques et Sciences des Matériaux. La planification des expériences a été réalisée en adoptant le plan de Box-Behnken .

IV. 2. Partie I : Matériels et méthodes**IV. 2. 1. Description du système de séchage (séchoir hybride)**

Les systèmes de séchage actifs (hybrides) utilisent des systèmes de chauffage solaire et électrique et des ventilateurs pour faire circuler l'air. L'apport d'énergie auxiliaire peut être : La puissance supplémentaire aide à maintenir une température constante à l'intérieur de la sécheuse, quelle que soit la météo.

L'énergie solaire devient secondaire car elle permet de chauffer l'air.

IV.2. 1. a. Capteur solaire

Il s'agit d'un capteur solaire plat incliné d'une longueur de 2,5 m, d'une largeur de 1 m et d'une hauteur de 0,13 m. C'est une unité qui reçoit le rayonnement solaire qui tombe dessus à travers une plaque métallique absorbante (longueur 2,5 mètres, largeur 0,86) peinte en noir (facteur d'absorption = 0,90 et facteur d'épuisement = 0,8) et la convertit en énergie thermique. La chaleur est transférée à la chambre de séchage.

Isolation thermique 0,06 m de polystyrène et d'épaisseur de verre 0,004 m.

IV.2. 1. b. Chambre de séchage

La chambre de séchage est un caisson d'une longueur de 1 m, d'une largeur de 0,63 m et d'une hauteur de 2,8 m. Il a également une résistance électrique de $P = 1500$ kW qui est contrôlée par un thermostat et une claie en maille rectangulaire galvanisée sert de support au produit à sécher.

IV.2. 1.c. Ventilateur

L'air chauffé dans le capteur solaire plan, est aspiré par le ventilateur centrifuge KF-30A (1400 tours/min, débit 19,5 m³/min). Il est envoyé vers la chambre de séchage où sont disposés les produits à sécher. L'air traverse les claies suivant la direction normale à leur surface. A la sortie du séchoir, l'air est recyclé à travers une conduite d'aspiration.

IV.2. 1.d. Balance

L'appareil mesure le poids du produit à sécher.

IV.2. 1.e. Thermostat

Il fonctionne pour maintenir la même température ambiante imposée, quelles que soient les conditions.

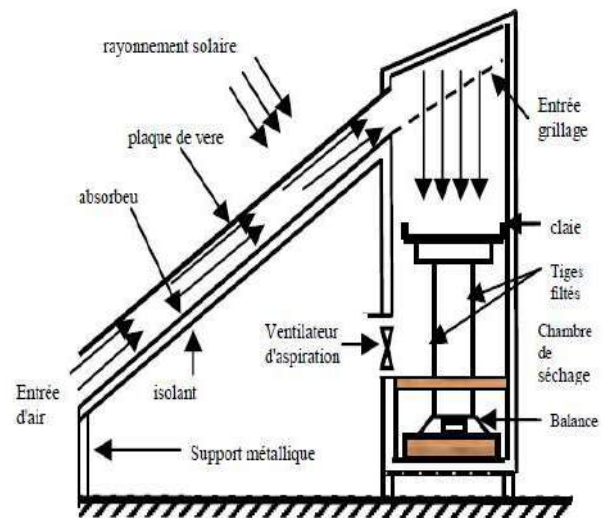


Figure IV.1 : Séchoir solaire indirect à convection forcée.

IV. 2. 2. Fonctionnement du système de séchage

Le capteur solaire fonctionne pour capter l'air de l'extérieur puis le transférer à l'intérieur de la chambre de séchage, qui contient une résistance électrique qui chauffe l'air pour assurer le séchage des échantillons existant sur le claie perforé, puis le ventilateur expulser l'air. Remarque : Le rôle de la résistance électrique est d'élever la température de l'air.

IV .2. 3. Protocole expérimentale et méthodologie de travail

Pour garder une trace de la quantité d'eau qui s'est évaporée de la pomme de terre pendant le processus de séchage, sa masse doit être mesurée à l'aide d'une balance fine et dans diverses expériences, la masse était comprise entre (115 et 230 grammes). Contrôler la température de séchage pour chaque expérience à l'aide d'un thermostat (min 40°C et max 55°C). L'épaisseur des tranches (0,5 cm minimum et 1 cm maximum). et la vitesse de l'air (minimum 2,5 m/s et maximum 5 m/s) selon les conditions expérimentales.

Le temps de séchage est le temps qu'il faut à un produit pour sécher jusqu'à ce qu'il atteigne son taux d'humidité final. Le produit est stocké dans un endroit sec pour éviter le dessèchement. Des mesures de masse sont effectuées toutes les heures au début de l'expérience jusqu'à ce que l'échantillon atteigne la moitié de sa masse initiale, puis il est contrôlé toutes les quinze minutes jusqu'à ce qu'il soit stable.

IV.2. 3. a. Préparation de séchoir

Pour assurer le bon fonctionnement du sèche-linge, les étapes suivantes doivent être suivies :

- Nettoyez d'abord la fenêtre du capteur solaire en particulier et l'appareil en général.
- Deuxièmement, colmatez toutes les fuites dans la chambre de séchage.
- Troisièmement, préparez la balance pour mesurer le produit à sécher.
- Quatrièmement, ajustez la résistance électrique en fonction de la température du sèche-linge.
- Enfin, faites fonctionner le sèche-linge pendant 10 minutes pour contrôler la répartition de la température à l'intérieur de la pièce.

IV.2. 3. b. Préparation du produit

Les pommes de terre ont été importées de la région El 'Oued ,

- les tubercules de pomme de terre doivent d'abord être épluchés.
- Deuxièmement, lavez-le à l'eau du robinet.
- Troisièmement, coupez-le en morceaux d'épaisseur égale à chaque essai entre (0,5 cm à 1 cm).
- Quatrièmement, répartissez-le uniformément sur le support en maille.
- Enfin, il est placé dans la chambre de séchage.



Figure IV.2: Tranches de Pomme de terre dans le claie.

IV. 2. 4. Colorimètre CHROMA METER CR-400

La quantification des changements de couleur des échantillons traités a été déterminée en utilisant un permettant l'acquisition automatisée des Paramètres L, a, b. Toute couleur est représentée par 3 coordonnées [L, a, b]

L : représente la clarté.

- Noir (correspond au noir de fumée) $\rightarrow L= 0$.
- Gris $\rightarrow L= 50$.
- Blanc (correspond au blanc de l'oxyde de magnésium) $\rightarrow L= 100$.

a : représente la composante chromatique (Rouge-Vert).

- Une valeur positive de a indiquant une localisation vers le rouge.
- Une valeur négative de a une localisation vers le vert.

b : représente le composante chromatique (jaune-Bleu).

- Une valeur positive de b indiquant une localisation vers le jaune.
- Une valeur négative de b indiquant une localisation vers le bleu.

Pour chaque prélèvement d'échantillon, Le changement de couleur global est alors exprimé par la quantité ΔE dite distance de couleur. C'est une valeur simple qui tient compte des différences de L, de a et de b entre un échantillon et un autre échantillon de référence. ΔE est calculée en utilisant l'équation (IV-1), où L_0 , a_0 et b_0 se rapportent aux valeurs de couleur référence (pomme de terre fraîche).

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2} \quad (IV.1)$$

L_0, a_0, b_0 :représente les valeur des tranche fraiche .

Résultats et discussion

IV. 3. Résultats et discussion**IV. 3.1. Domaine de variation des paramètres pour le plan de Box-Behnken**

Les trois facteurs jugés susceptibles d'affecter l'opération du séchage sont tous des facteurs quantitatifs, c'est à dire des facteurs dont on peut maîtriser le réglage, et qui peuvent adopter toutes les valeurs numériques réelles dans l'intervalle choisi.

Ainsi, nous avons les facteurs et leurs domaines de variation comme suit:

- La température de l'air asséchant (T) compris entre 40°C et 55°C. Le choix de ce valeur expérimental est basé sur les données de littératures précédentes
- La vitesse de l'air asséchant(V) varie entre 2,5 et 5 m/s .
- L'épaisseur des tranches de pomme de terre (E) est comprise entre 0,5 et 1 cm.

Le tableau IV.1 montre les trois facteurs qui ont été étudiés simultanément afin de quantifier l'effet de chacun d'entre eux sur l'opération de séchage de la pomme de terre.

Les expériences de séchage ont été réalisées selon un plan d'expériences factoriel fractionnaire à deux niveaux et trois variables. Le tableau IV.1 regroupe les niveaux bas et haut pour chaque variable.

Tableau IV.1: Domaine de variation des paramètres pour le plan de Box-Behnken ..

Facteurs	T (°C)	V (m/s)	E (cm)
Niveau bas	40	2.5	0.5
Niveau centre	50	3.75	0.75
Niveau haut	55	5	1

Les résultats du plan d'expériences établi pour le séchage de la pomme de terre sont illustrés dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 : Plan d'expériences en variable réelles et en variable codées.

N°d'essai	Variables réelles			Variable codées		
	T(°C)	V(m/s)	E(cm)	T	V	E
(01)	40	2.5	0.75	-1	-1	0
(02)	55	2.5	0.75	1	-1	0
(03)	40	5	0.75	-1	1	0
(04)	55	5	0.75	1	1	0
(05)	40	3.75	0.5	-1	0	-1
(06)	55	3.75	0.5	1	0	-1
(07)	40	3.75	1	-1	0	1
(08)	55	3.75	1	1	0	1
(09)	47.5	2.5	0.5	0	-1	-1
(10)	47.5	5	0.5	0	1	-1
(11)	47.5	2.5	1	0	-1	1
(12)	47.5	5	1	0	1	1
(13)	47.5	3.75	0.75	0	0	0
(14)	47.5	3.75	0.75	0	0	0
(15)	47.5	3.75	0.75	0	0	0

IV. 3.2. Réponses étudiées

Les réponses étudiées sont le temps de séchage et le changement de la couleur ΔE . La figure IV.3. présente le changement de couleur des pommes de terre sèches pour les 15 essais.

Tableau IV.3: Plan d'expériences et résultats expérimentaux.

N°d'essai	Facteurs			Réponses	
	T (°C)	V (m/s)	E (cm)	Temps de séchage (min)	ΔE (-)
(01)	40	2.5	0.75	420	20,91
(02)	55	2.5	0.75	330	17,74
(03)	40	5	0.75	430	15,77
(04)	55	5	0.75	396	20,60
(05)	40	3.75	0.5	292	20,24
(06)	55	3.75	0.5	308	21,16
(07)	40	3.75	1	590	16,69
(08)	55	3.75	1	510	17,65
(09)	47.5	2.5	0.5	320	22,49
(10)	47.5	5	0.5	225	15,47
(11)	47.5	2.5	1	565	14,77
(12)	47.5	5	1	410	16,05
(13)	47.5	3.75	0.75	370	14,34
(14)	47.5	3.75	0.75	385	17,29
(15)	47.5	3.75	0.75	378	15.81

IV. 3. 3. Analyse du modèle

Les coefficients de régression du modèle permettent d'aboutir à l'équation donnant Le temps de séchage et le changement de la couleur prévu en fonction des trois paramètres étudiés.

La modélisation fournit une équation polynomiale permettant de prévoir la réponse, quelles que soient les conditions de travail. Le système peut répondre à une équation polynomiale du premier ou du second degré.

Le modèle mathématique de temps de séchage (t) est donné par l'équation suivante :

$$te = 377,667 - 23,5T - 21,75V + 116,25E + 30,6667T*T + 14,0T*V - 24,0T*E - 14,3333V*V - 15,0V*E + 16,6667E*E$$

Avec :

- + T : Température de séchage.
- + V : Vitesse de l'air asséchant.
- + E : Epaisseur de produit asséchée

Tableau IV.4: Les valeurs des coefficients du modèle mathématique du temps de séchage

Coefficient	Valeur
constant	377,667
A:T	-23,5
B:V	-21,75
C:E	116,25
AA : TT	30,6667
AB : T*V	14,0
AC : T*E	-24,0
BB: V*V	-14,3333
BC: V*E	-15,0
CC: E*E	16,6667

où :

- + A, B, C sont les effets linéaires
- + A*A, B*B, C*C et A*B, A*C, *C sont les effets d'interaction double X_iX_j

Tableau VI.4 : Récapitulatif du modèle mathématique de temps de séchage

S	R carré(R ²)	R carré (ajust)
53,77	89,68 %	71,11 %

La valeur du coefficient de détermination R² est égale à 89,68%, ce qui signifie un bon ajustement du modèle proposé.

Le modèle mathématique du changement de la couleur est représenté sous la forme suivante :

$$\Delta E = 15,8133 + 0,4425T - 1,0025V - 1,775E + 2,34083T*T + 2,0TV + 0,01T*E + 0,600833V*V + 2,075V*E + 0,780833E*E$$

Tableau IV.5: Les valeurs des coefficients du modèle mathématique du changement de la couleur.

Coefficient	Valeur
constant	15,8133
A:T	0,4425
B:V	-1,0025
C:E	-1,775
AA : TT	2,34083
AB : T*V	2,0
AC : T*E	0,01
BB: V*V	0,600833
BC: V*E	2,075
CC: E*E	0,780833

Tableau VI.5 : Récapitulatif du modèle mathématique du changement de la couleur

S	R carré (R ²)	R carré (ajust)
1,08209	93,9011 %	82,9232 %

Le coefficient de détermination R²=93,90% est suffisant. Cette valeur donne une bonne compatibilité entre les valeurs expérimentales et prévues du modèle adapté.

Le modèle contient des paramètres de la régression qui comprennent des coefficients des effets principaux (A, B, C) et les coefficients de effets de l'interaction entre des deux facteurs et entre trois facteurs (A*A, B*B, C*C et A*B, A*C, *C).

Les différentes valeurs des coefficients du modèle mathématique sont mentionnées sur le tableau IV.4 et 5 dont :

- Constante: Coefficient qui présente la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude ($T = 47.5 \text{ °C}$, $V = 3.75 \text{ m/s}$ et $E = 0.75 \text{ cm}$).
- A : présente l'effet principal de la température.
- B : présente l'effet principal de la vitesse.
- C : présente l'effet principal de l'épaisseur.
- T*V : **Interactions** entre la température et la vitesse.
- T*E: **Interactions** entre la température et l'épaisseur.
- V*E : **Interactions** entre la vitesse et l'épaisseur.

IV .4. Analyses de variance (ANOVA)

On utilise les résultats des analyses de variance (en anglais : ANalysis Of VAriance, ANOVA) représentés sous la forme du diagramme de Pareto pour visualiser l'effet des facteurs sur la réponse. Les effets individuels de divers paramètres ainsi que leurs interactions peuvent être étudiés à partir du diagramme de Pareto illustré par la figure (IV.4) en utilisant le logiciel STATGRAPHICS. Un facteur dont la valeur est plus grande que la barre verticale représentée sur le diagramme est significatif

Les graphiques de Pareto classent les facteurs et leurs interactions en fonction de leur influence sur la réponse. Les figures (IV.4) Présentent les différents effets de l'opération sur le temps du séchage qui représente (illustre) le comportement des facteurs de procédé étudiés et son impact sur le temps du séchage (t_e) et le changement de couleur (ΔE).

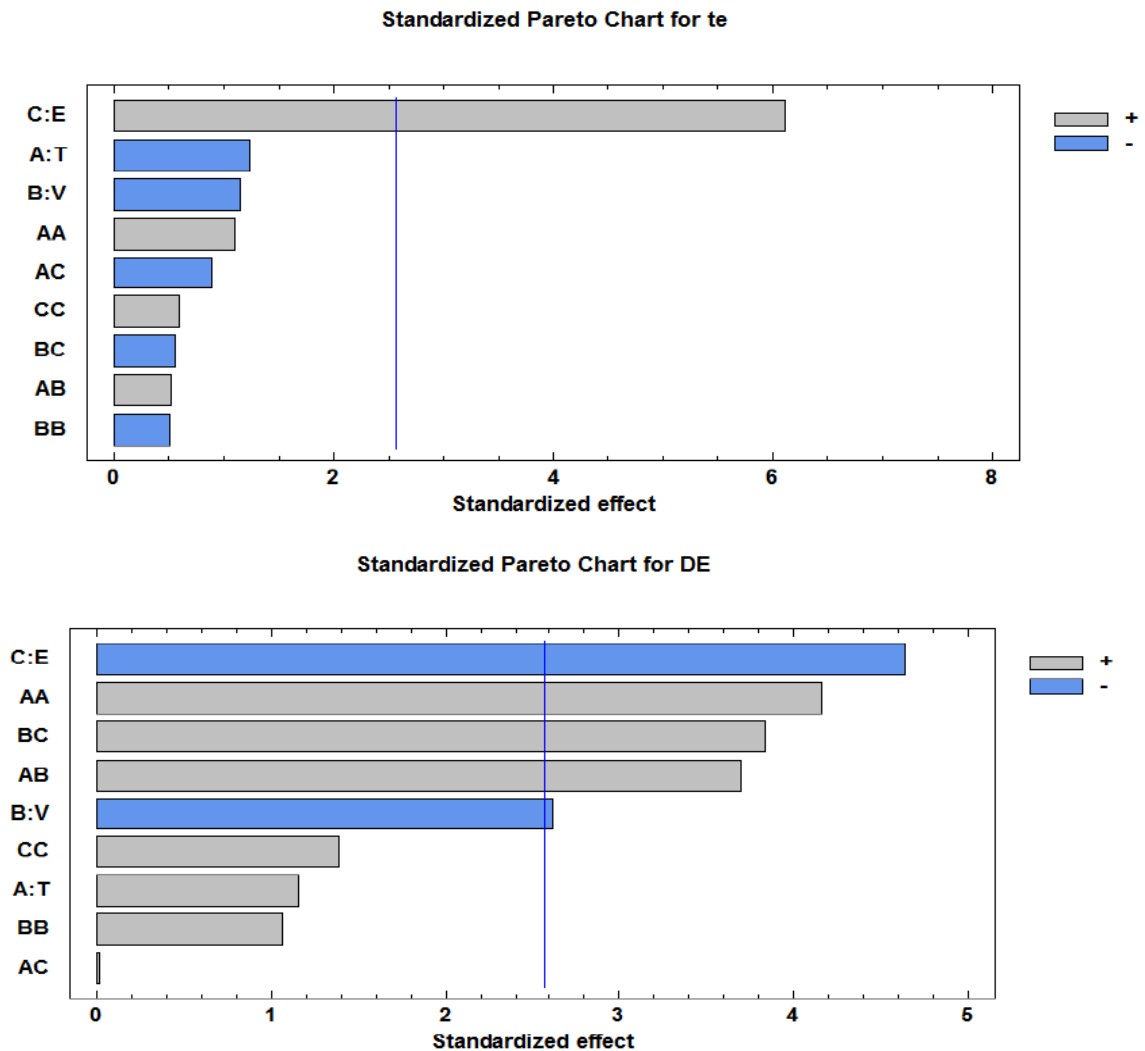


Figure IV.4 : Diagramme de Pareto des effets significatifs sur le temps du séchage (t_e) et le changement de couleur (ΔE).

La Figures (IV.4), Graphique de Pareto , illustre neuf effets: les effets principaux T, V et E, l'interaction double entre T-V, T-E, V-E, T-T, V-V, E-E.

Tous les effets allant au-dessous de la ligne de référence sont n'est pas significatifs.

L'analyse statistique du paramètre temps de séchage montre: les plus importants est l'effet de l'épaisseur de produit asséchée; le faible effet de la température et de la vitesse d'air , et l'effet l'interaction double.

L'analyse statistique du paramètre changement de la couleur montre que l'effet de l'épaisseur de produit asséchée et la vitesse d'air aussi l'effet de l'interaction double T-T, V-V et T-V s'étendent au la ligne de référence.

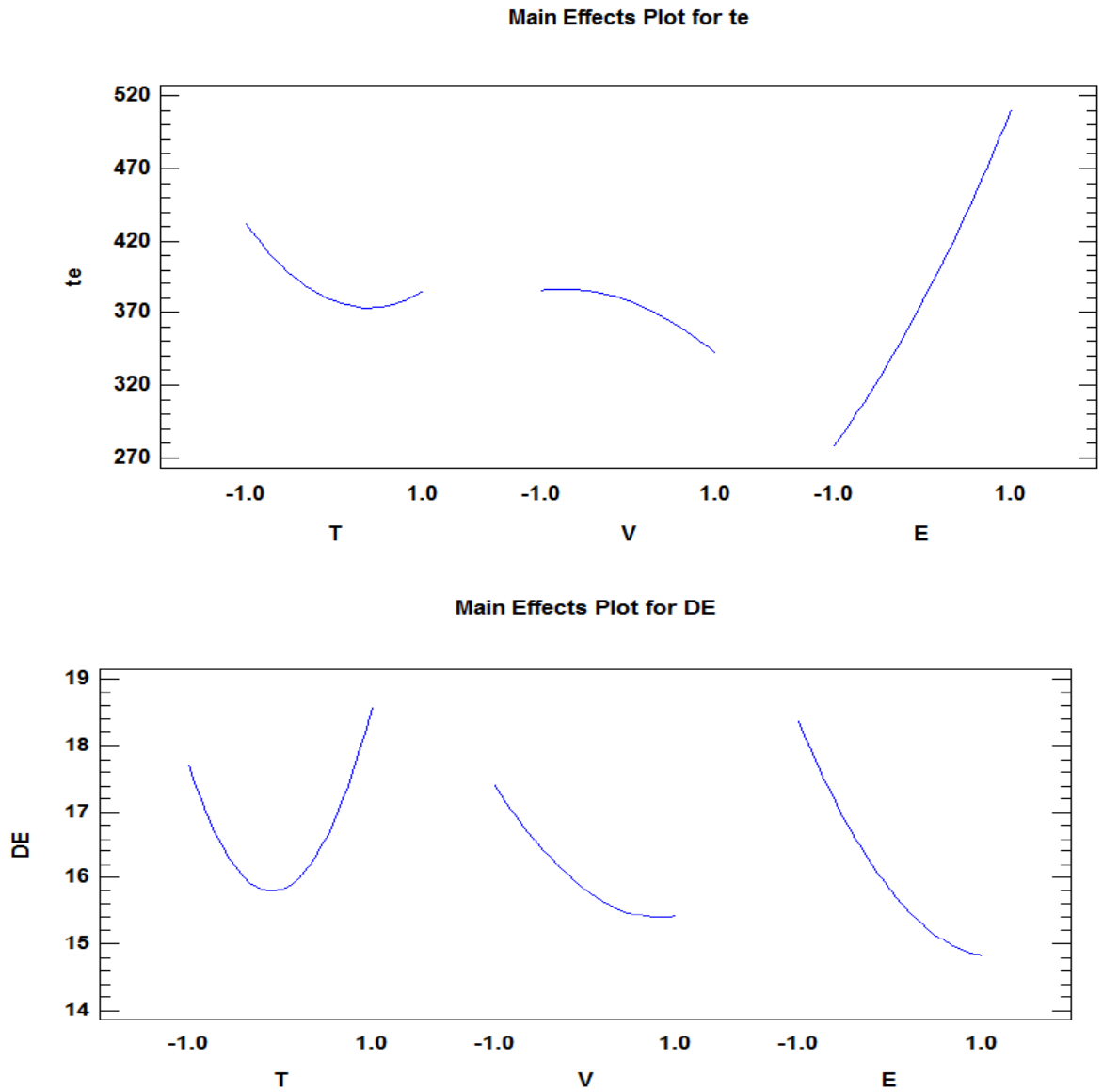


Figure IV.5 : Graphiques des effets des principaux facteurs sur le temps de séchage et le changement de couleur

La Figure(IV.5) : présente les effets des principaux facteurs sur les réponses. De cette figure, il ressort que le facteur le plus influant sur le temps de séchage (te) changement de couleur (ΔE) est l'épaisseur de produit asséchée (Facteur C).

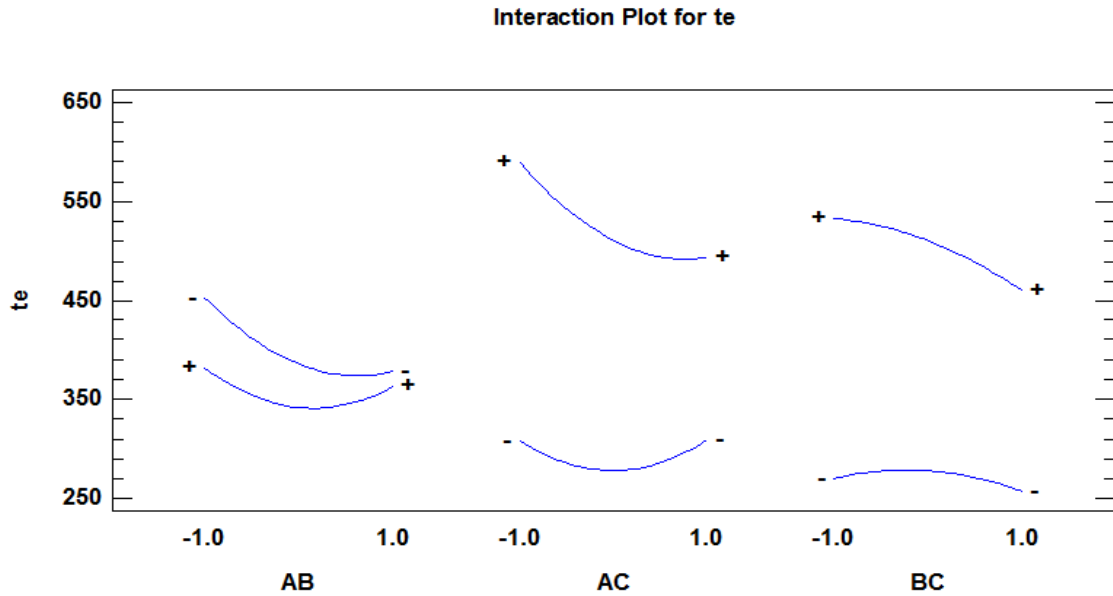


Figure IV.6 : Profil d'interaction des facteurs agissant sur le temps de séchage.

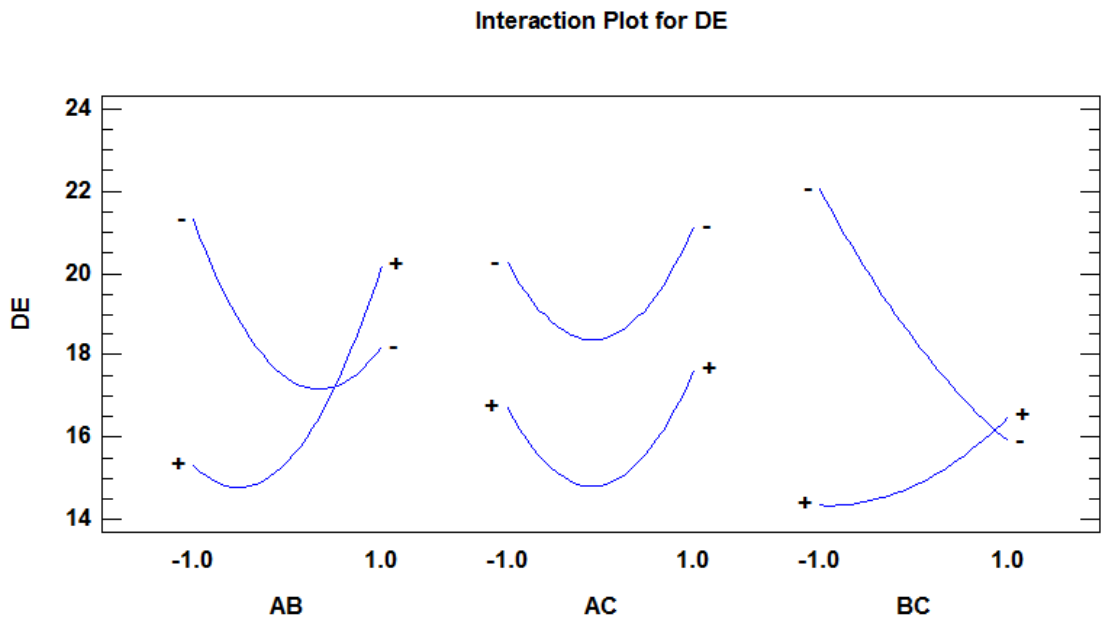


Figure IV.7 : Profil d'interaction des facteurs agissant sur le changement de couleur.

.Dans le diagramme des interactions (IV.6 et 7) :

- ✓ les deux droites sont parallèles : nous pouvons alors considérer l'interaction comme négligeable; c'est le cas de la Température d'air-Epaisseur de produit asséchée (AC) sur Les deux réponses

- ✓ les deux droites possèdent des coefficients angulaires différents : cela signifie que l'interaction entre les deux facteurs n'est pas négligeable; c'est le cas de la Température - Vitesse d'air et Vitesse -. Epaisseur de produit asséchée sur la réponse de temps de séchage
- ✓ les deux droites sont sécantes : l'interaction est considérée comme forte, c'est le cas de la Température - Vitesse d'air et Vitesse -. Epaisseur de produit asséchée sur la réponse de changement de couleur

IV .5.Analyse des surfaces de réponses

Les surfaces de réponse sont des représentations graphiques à trois dimensions de la réponse du système étudié en fonction de deux paramètres, le troisième étant fixé. Ce type de représentation permet de rechercher des régions expérimentales pour lesquelles la réponse est optimale.

L'examen du graphique surface de réponse du temps de séchage de figure(IV.8) ((a), (b), (c)), indique la hauteur de la surface de réponse. Cette hauteur représente la valeur prévue du temps « Y_1 » de séchage dans les plages affichées de *température* « X_1 » et de *vitesse* « X_2 », avec l'épaisseur maintenue fixé « X_3 ».

La figure IV.8 (a) montre que le temps de séchage est optimal lorsque la température d'air est à son niveau supérieur et la vitesse d'air à son niveau inférieur.

On constate sur la figure IV.8 (a) que le temps de séchage augmente lorsque la température et la vitesse d'air et sont aux tours de niveaux supérieur ($X_1=+1$ et $X_2=+1$).

On constate sur la figure IV.8 (b) qu'à une température d'air (X_1) plus bas ou plus élevée, le temps de séchage augmente lorsque l'épaisseur de l'échantillon augmente (X_3).

Sur la figure IV 8 (c) , on a remarqué un profil presque similaire à la figure IV 8 (b), lorsque la vitesse d'air est au tours de niveaux inférieurs ou supérieures est favorable pour l'obtention d'un changement de la couleur plus bas.

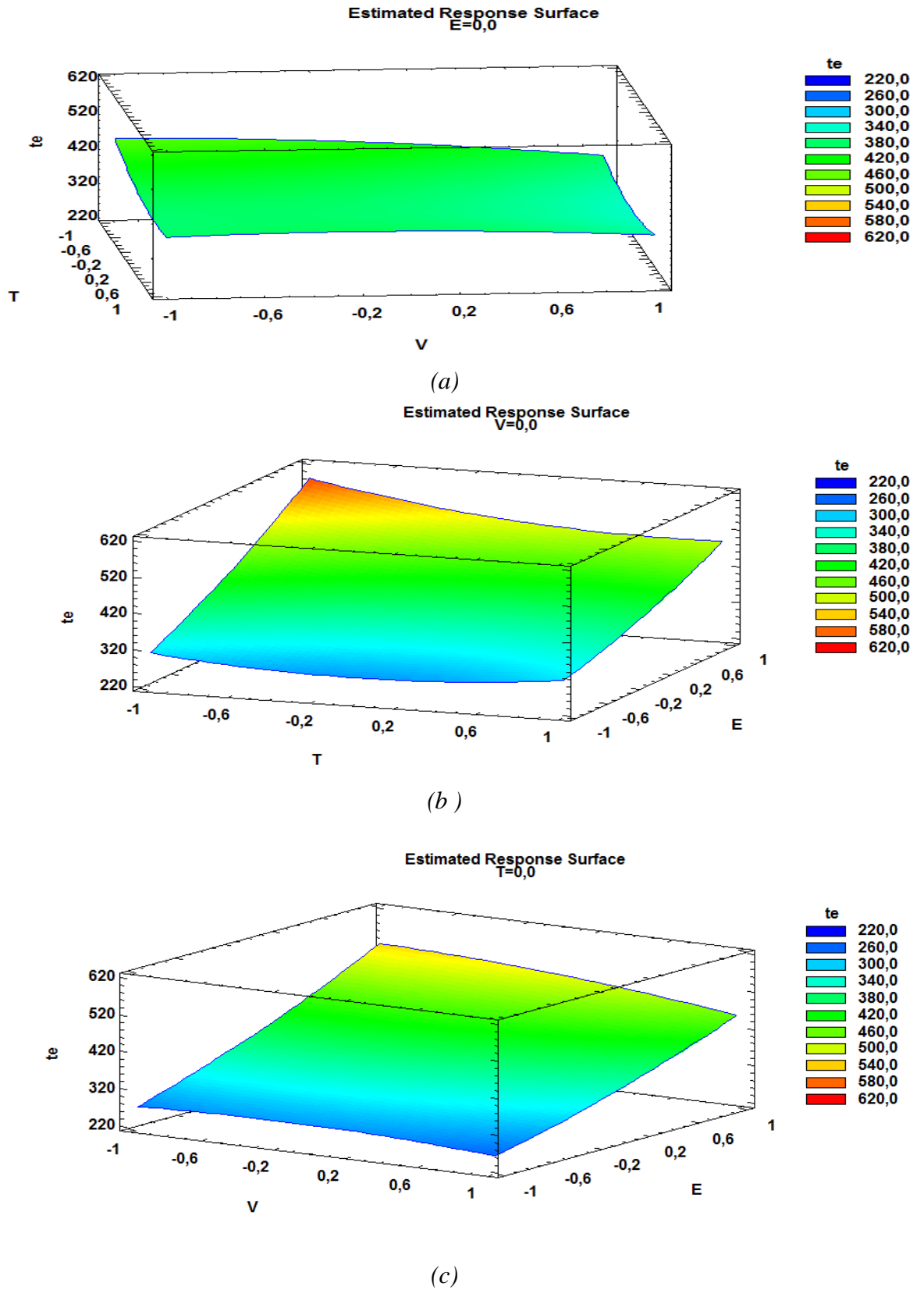


Figure IV.8 : (a,b et c). Surfaces de réponses du temps de séchage en fonction des trois couples de paramètres, Lors de chaque variation le 3^{ème} paramètre est maintenu à son niveau central "0"

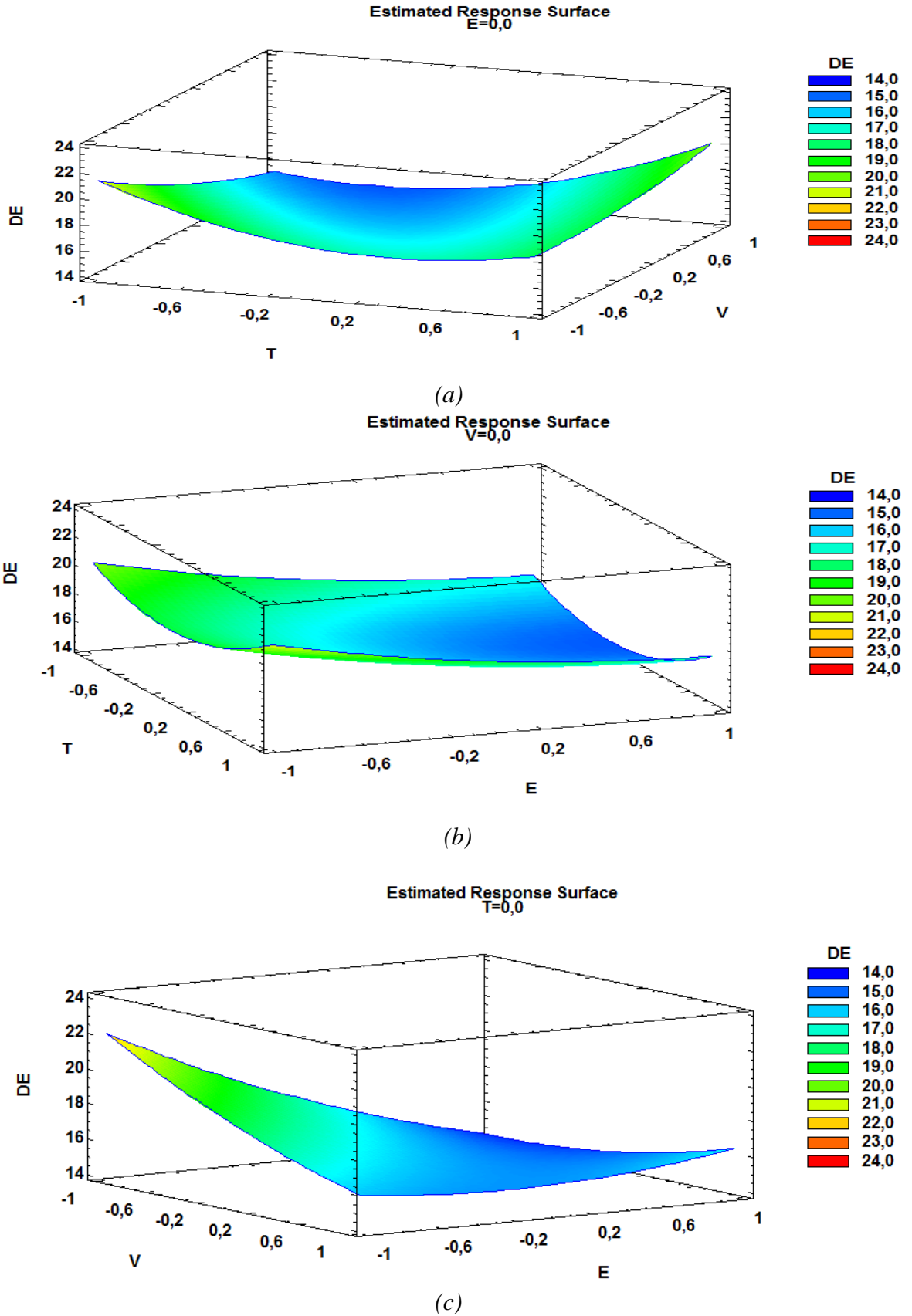


Figure IV.9.(a,b et c). Surfaces de réponses du changement de la couleur en fonction des trois couples de paramètres, Lors de chaque variation le 3ème paramètre est maintenu à son niveau central "0"

La relation entre les trois variables opératoires (Température « X_1 », Vitesse « X_2 » de l'air asséchant et épaisseur « X_3 » de tranche de la pomme de terre) et la réponse étudiée (Changement de la couleur « Y_2 ») est illustrée dans les représentations tridimensionnelles des surfaces de réponses (Figure IV.9 ((a), (b), (c))). Dans ces graphiques, la hauteur de la surface représente la valeur prévue de changement de la couleur.

Sur la figure IV 9 (a), on a remarqué un profil presque similaire à la figure IV 8 (a), lorsque vitesse d'air (X_2) plus bas ou plus élevée, le changement de couleur augmente lorsque l'épaisseur de l'échantillon (X_3) augmente.

Comme on peut voir sur la figure IV 9 (a) que le changement de la couleur augmente lorsque la température (X_1) et la vitesse (X_2) d'air augmente. Le changement de la couleur est optimal lorsque la température d'air est à son niveau inférieur et l'épaisseur de l'échantillon à son niveau supérieur.

Sur la figure, on a remarqué un profil presque similaire à la figure IV 8 (c), lorsque la vitesse d'air et l'épaisseur de l'échantillon sont aux tours de niveaux inférieurs ou supérieures sont favorables pour l'obtention d'un.

À la figure IV 9 (c), le changement de la couleur est minimale si la vitesse de l'air est à son niveau bas et l'épaisseur de l'échantillon à son niveau supérieur.

IV.6. Optimisation des paramètres :

L'objectif de l'expérimentation est de minimiser le temps du séchage et le changement de couleur.

Le diagramme d'optimisation illustré dans la figure IV.10, est appliqué afin de déterminer la combinaison des facteurs expérimentaux qui optimise de façon simultanée les deux réponses (temps du séchage et changement de couleur). Elle le fait en maximisant une fonction de désirabilité.

La désirabilité varie de 1 (cas idéal) à 0 lorsque les réponses sont en dehors de leurs limites acceptables. La valeur 1 correspond à une satisfaction maximale, la valeur 0 à un refus complet.

D'après les tracés des surfaces de réponses illustrées dans la figure IV.10, correspondant au cas où le temps de séchage et le changement de couleur seront les réponses du système.

À la figure IV.10, la désirabilité est maximale si la vitesse de l'air est à son niveau haut et l'épaisseur de l'échantillon à son bas.

Le point optimum obtenu par le logiciel est :

- **En variable codées** : $X_1 = -0.45$; $X_2 = +1$; $X_3 = -1$
- **En variable réelles** : $T = 44\text{C}$; $V = 5 \text{ m/s}$; $E = 0.5 \text{ cm}$

La valeur optimum de temps du séchage: $t = 256,78 \text{ min}$.

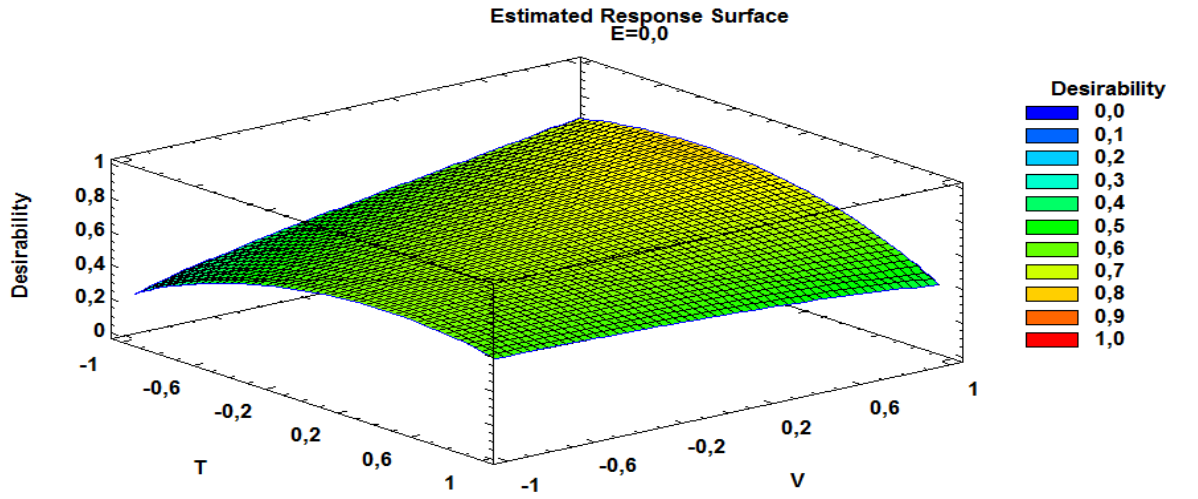
La valeur optimum du changement de couleur. $\Delta E = 15,26$

Pour finaliser les tests de la validité du modèle retenu, nous avons réalisé un essai dont le résultat correspond aux réponses souhaitées. Les coordonnées sont: $X_1 = -0.45$; $X_2 = +1$ et $X_3 = -1$.

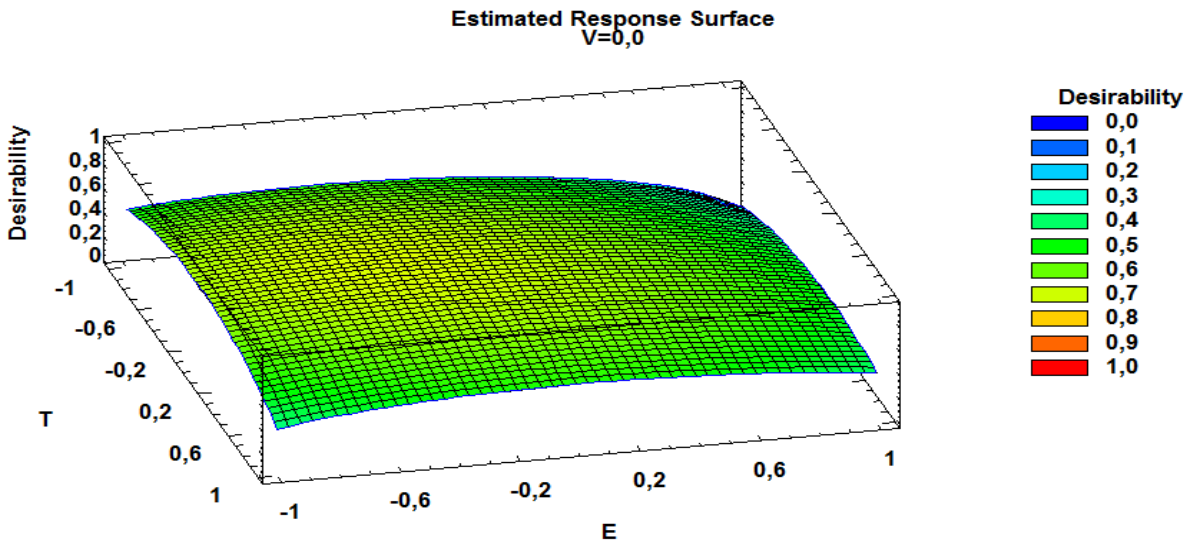
Tableau VI.6 : Expérience de validation dans des conditions optimales:
($T = 44\text{C}$; $V = 5 \text{ m/s}$; $E = 0.5 \text{ cm}$).

	Valeur Prédite	Valeur expérimentale	Erreur (%)
Temps de séchage	256.78 min	267min	3.82%
changement de couleur	15.26	15.79	3.35%

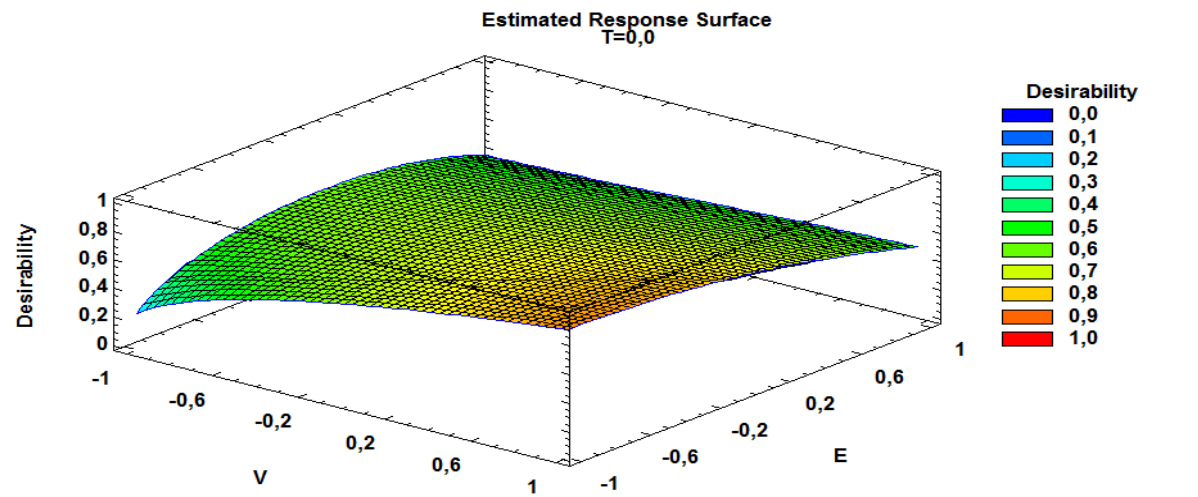
Les résultats mentionnés sur le tableau VI.6 montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les réponses expérimentales et celles prédites



(a)



(b)



(c)

Figure IV.10: Surfaces des réponses des fonctions de désirabilité



CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans cette étude, la Méthode des Surfaces de Réponse (MSR) a été utilisée pour optimiser les conditions opératoires. La méthodologie des surfaces de réponses a été utilisée avec succès pour évaluer les effets du Température, Vitesse de l'air asséchant et épaisseur de tranche de la pomme de terre sur temps de séchage et changement de la couleur du processus de séchage solaire de la pomme de terre.

Pour étudier l'effet des paramètres de fonctionnement du séchage, trois paramètres de fonctionnement doivent être fixés : la température de séchage (entre 40 et 55 °C), la vitesse de l'air de séchage (entre 2,5 et 5 m/s) et l'épaisseur des échantillons (entre 0,5 et 1 cm) .

Le développement des modèles mathématiques pour les opérations du séchage est devenu un outil utile pour déterminer les conditions optimales. L'équation qui régit le système est de la forme : $Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_{1,2} X_1 X_2 + a_{1,3} X_1 X_3 + a_{2,3} X_2 X_3$

Les paramètres optimisés du sécheur à air chaud sont indiqués ci-dessous : la température de l'air est de 44 °C, la vitesse de l'air est de 5 m/s et l'épaisseur de l'échantillon est de 0,5 cm. Dans ces conditions, le temps de séchage est de 256,78 minutes et la différence de couleur est de 15,26



REFERENCES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Albitar ,N . Etude comparative des procédés de séchage couplés à la texturation par Détente Instantanée Contrôlée DIC, en termes de cinétique et de qualité nutritionnelle. Applications à la valorisation des déchets agro-industriels [Thèse de Doctorat] .Université de la Rochelle, Faculté des Sciences et Technologie,2010 . P57
- Bekakra , Y , khefi ,D. Optimisation des paramètres influençant sur le séchage de la pomme de terre par la méthode de plan d'expérience [Mémoire de Master].Université Ouargla, Faculté des Sciences Appliquées, 2017. P5
- BelgharbiA ,Abib S . Utilisation des plans expérience pour la formulation des pâtes cimentaires auto-plaçants[Mémoire de Master].Université de Bouira , Faculté des Sciences et Sciences Appliquées, 2016 .P51
- Belkadi ,T , Makked , L . Traitement des margines d'olives par co-precipitation en utilisant les plans d'expériences[Mémoire de Master. Université de Tizi-Ouzou , Faculté des sciences ,2016 . P13
- Belkadi ,T , Makked , L . Traitement des margines d'olives par co-precipitation en utilisant les plans d'expériences[Mémoire de Master].Université de Tizi-Ouzou , Faculté des sciences ,2016 .P14-15
- Belkadi ,T , Makked , L . Traitement des margines d'olives par co-precipitation en utilisant les plans d'expériences[Mémoire de Master]. Université de Tizi-Ouzou , Faculté des sciences ,2016 .P13
- Berrebeuh, M . Etude de validité des cinétiques de séchage en convection forcée pour les applications de séchage Solaire de certains produits alimentaires [Mémoire de Magister]. Université Ouargla ,Faculté des Sciences Appliquées, 2009 . P13
- Berrebeuh, M . Etude de validité des cinétiques de séchage en convection forcée pour les applications de séchage Solaire de certains produits alimentaires [Mémoire de Magister].Université Ouargla ,Faculté des Sciences Appliquées, 2009 . P18-19
- Boubeghal, A.,Benhammou, M., Omari, B., Amara, S., Amer, L., Mounzar H.,Ouejdi, S.Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection naturelle [Revue des Energies Renouvelables] 2007, p 315 -320..
- Boulemtafes, A., Le séchage solaire des produits agricoles, [Bulletin des Energies Renouvelables] 201121, p 10-12.

- CHekroune ,M. Etude de comparative de deux techniques de séchage (convection et micro-onde) par application des plans d'expérience . Cas du fruit de datte [Mémoire de Magister] .Boumerdes : Université de Boumerdes , Faculté des Sciences de l'Ingenieur , 2008 . P13
- DJaafour , N . État des lieux de la filière pomme de terre dans la région d'El Oued [Mémoire de Master]. Université d'El-Oued , Faculté Sciences de la nature et de la vie ,2019 . P13
- Fadil, M., Farah, A., Ihssane, B.,Haloui, T.,Rachiq, S.,Optimization of parametersinfluencing the hydrodistillation of Rosmarinusofficinalis L. by response surface methodology[J. Mater. Environ. Sci.] 2015,6 (8), p2346-2357
- Ghazzoul,Y , Rachdi,I. Optimisation du séchage de la pomme de terre en utilisant la méthodologie des surfaces de réponses [Mémoire de Master]. Université Ouargla, Faculté des Sciences Appliquées ,2020.P4
- Goupy , J. Faites connaissance avec la méthode des plans d'expériences . Introduction aux plans d'expériences . 3^{eme} édition . Paris : Dunod ; 2006 .P6
- Goupy,J.Modélisation par les plans d'expériences . R275 . P17
- Houhou ,H, Etude théorique et expérimentale du séchage solaire de certains produits agro-alimentaires [Mémoire de Magister]. Université Biskra, Faculté des Sciences et de la Technologie , 2012 . P39
- [http://www.fao.org/potato-2019/fr/pomme de terre](http://www.fao.org/potato-2019/fr/pomme%20de%20terre); consulté le 4/6/2021
- <https://support.minitab.com>; consulté le 08/06/2021
- Khendoudi ,Z . Productivité de plantes de pomme de terre (SolanumTuberosum L), issues de minitubercules. Essai variétal [Mémoire de Magister].Universite de Blida 1 ,Faculte des Sciences de la Nature et de la Vie ,2016 .P19
- Kimouche , K . Etude dequelques plans d'expériences associées aux surfaces de réponse [Mémoire de Magister].Universite de Constantine , Faculte des Sciences Exactes , 2008 . P48-50
- Lamara , M . Bioécologie de la teigne de la pomme de terre Phthorimaeaoperculella Zeller (Lepidoptera : Gelechiidae) sur trois variétés de pomme de terre (la Spunta, la Désirée et la Burren) dans les régions des Issers et Draa ben khedda et inventaire de l'entomofaune au niveau des parcelles des Issers[Mémoire de Master].Université de Tizi-Ouzou , Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques , 2015.P10
- MecheriA ,Kouici A . Etude d'amélioration de l'homogénéité du champ thermique dans un séchoir solaire en utilisant la méthode des plans d'expériences [Mémoire de Master].Université Ouargla ,Faculté des Sciences Appliquées, 2019. P5-6

- Meghachou , W , Approche méthodologique à la modélisation par les plans d'expériences pour l'élaboration d'un yaourt [Mémoire de Magister].Université d'Oran, Faculté des Sciences ,2014 . P21
- Mennouche , Dj .Valorisation des produits agro-alimentaires et des plantes medicinales par les procedes de séchage solaire [Mémoire de Magister]. Université Ouargla, Faculté des Sciences Appliquées , 2006 .P16.
- Miloud , D . Etude de l'évolution de logiciel : approche par plan d'expériences [Thèse de Doctorat]. Université d'Oran ,Faculté des Sciences Exactes et Appliquées , 2019 .P66
- Missoum, Dj. Optimisation d'un Système de Séchage Solaire des Produits Agro-alimentaires [Mémoire de Master].Université de Tlemcen , Faculté des Sciences , 2016 . P30
- Nguyen ,TH . Etude expérimentale et modélisation du procédé de séchage des végétaux .[Thèse de Doctorat].Université de Bretagne-Sud ,Faculté des Sciences de l'Ingénieur , 2015 . P24
- Ramdani , Dj , Haddouche ,L . Séchage des Produits Alimentaires : notions de bases, Cinétiques de Séchage et Modélisation [Mémoire de Master].Université de Bejaia, Faculté de Technologie , 2020 . P27
- SebbaghKh ,Cherfaoui I. Etude Du Séchage Des Produits Agricoles Dans un Séchoir Solaire-Cas De Poivron Rouge [Mémoire de Master]. Université de Boumerdes , Faculté des Sciences , 2017 .P29
- Touati , H . Adsorption de trichlorophénol par une dolomie modifiée [Mémoire de Master]. Université de Mostaganem , Faculté des Sciences et de la Technologie , 2019 .P46



ANNEXES



Figure A-1: Etapes de Nettoyage de capteur solaire



Figure A-2: Appareillé de mesure la vitesse

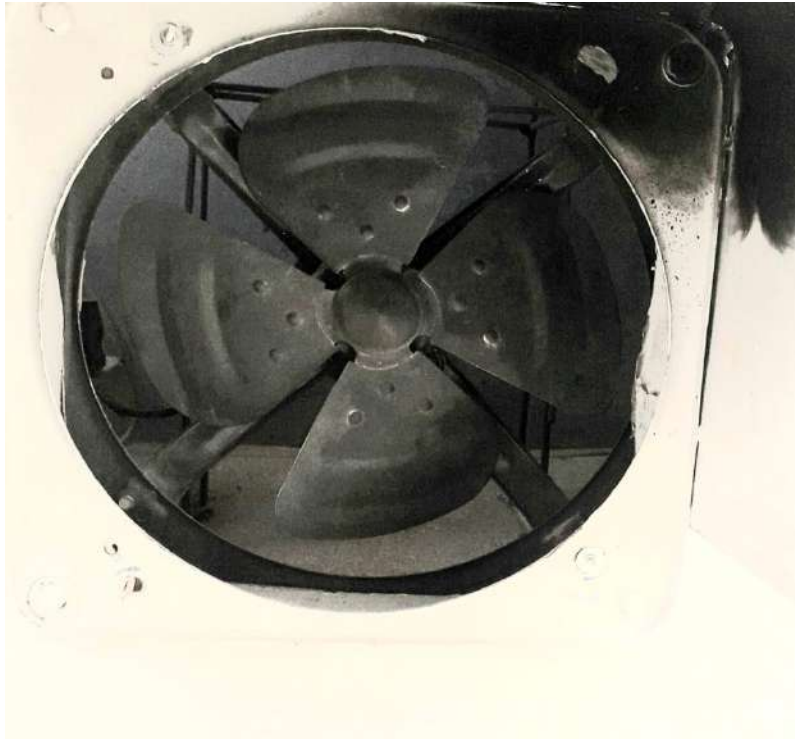


Figure A-3 : Ventilateur



FigureA-4:Réglage de la résistance selon la température de fonctionnement du séchoir



Figure A-5: la balance



Figure A-6: la préparation des Tranches de Pomme de terre



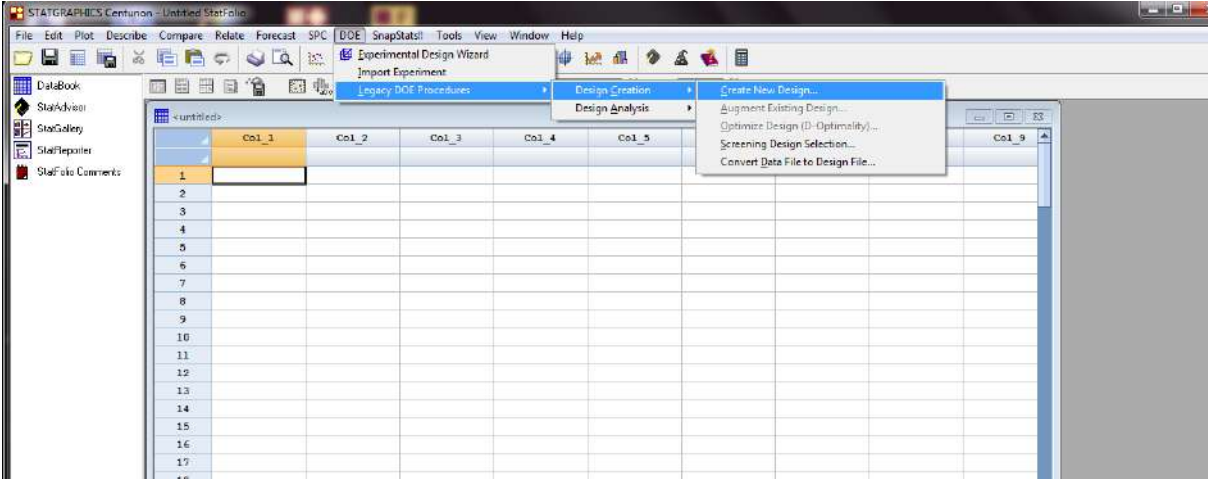
Figure A-7 : les tranches de Pomme de terre dans le séchoir



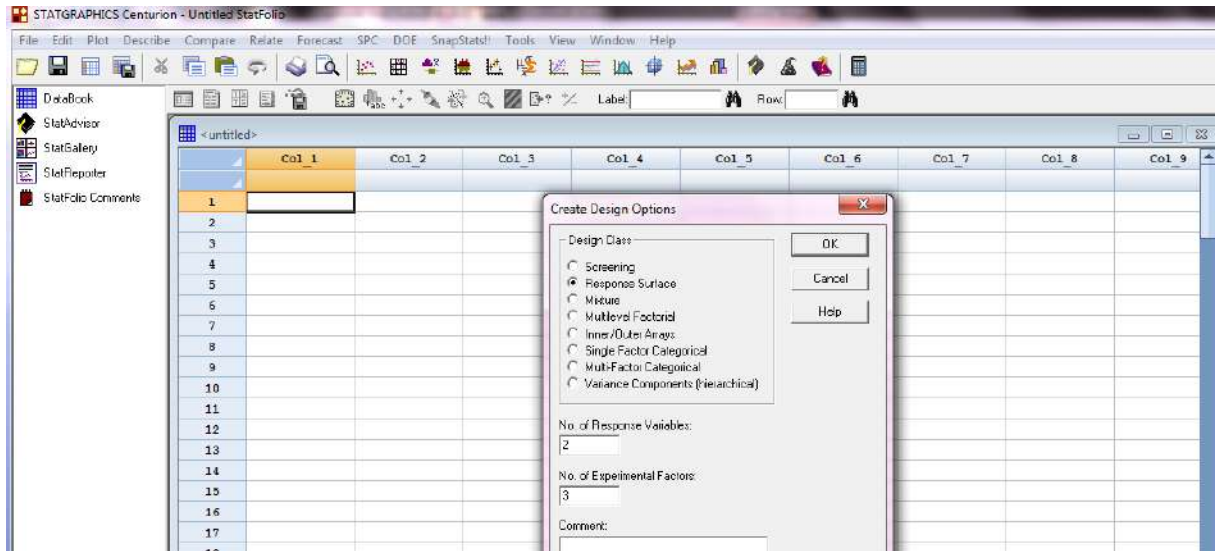
Figure A-8: Tranches séché de Pomme de terre



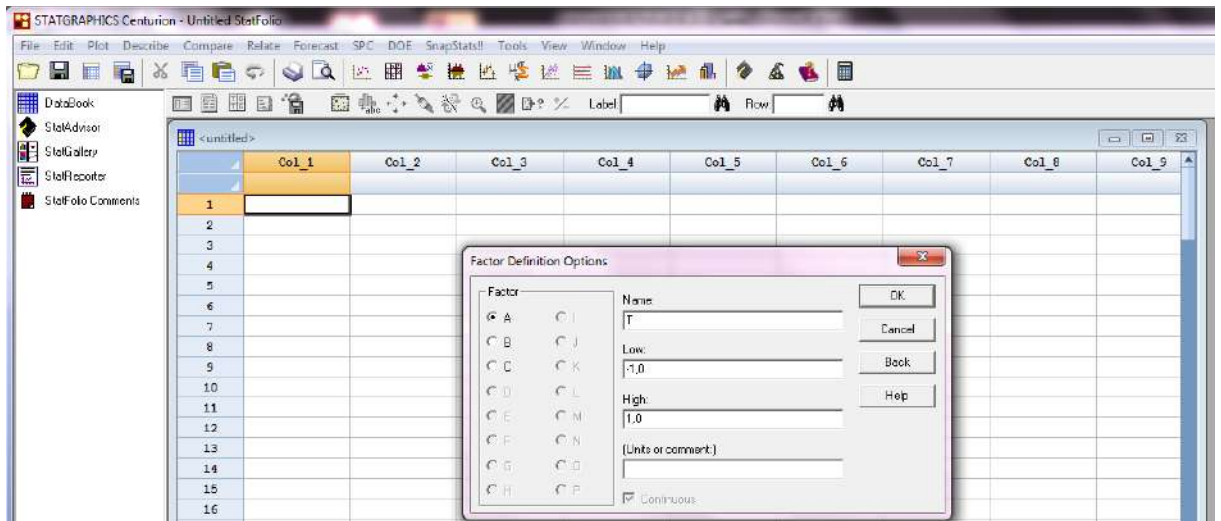
Figure A-9:Colorimètre CHROMA METER CR-400



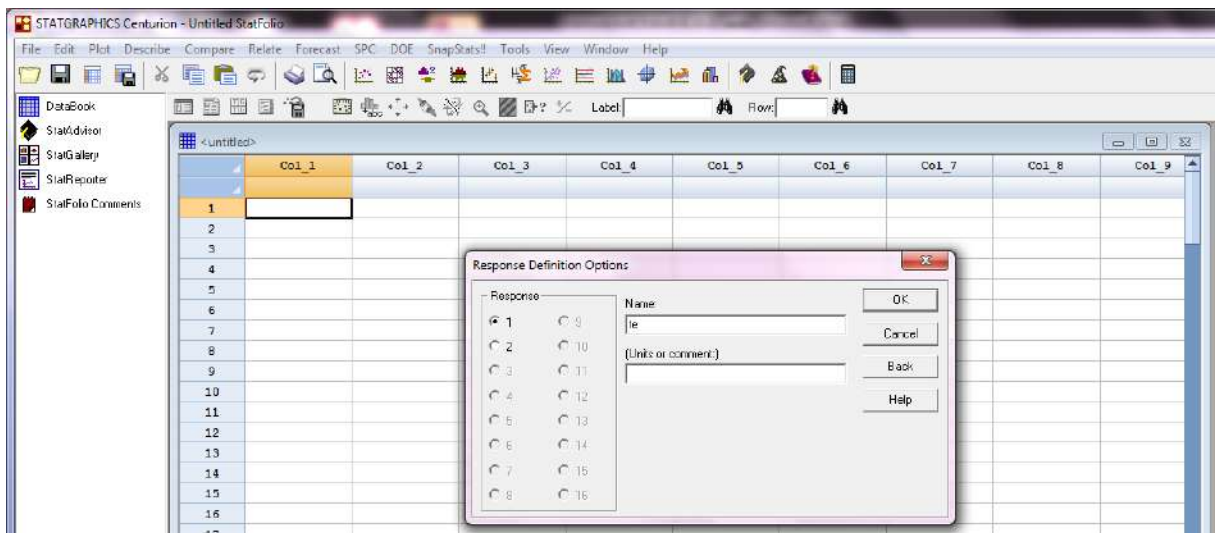
(a)



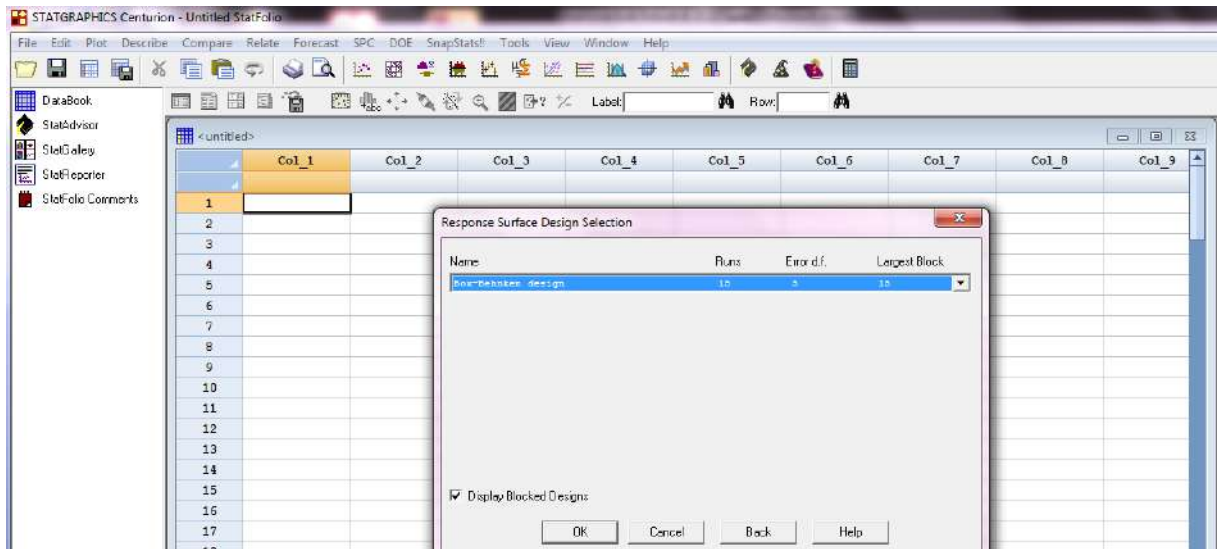
(b)



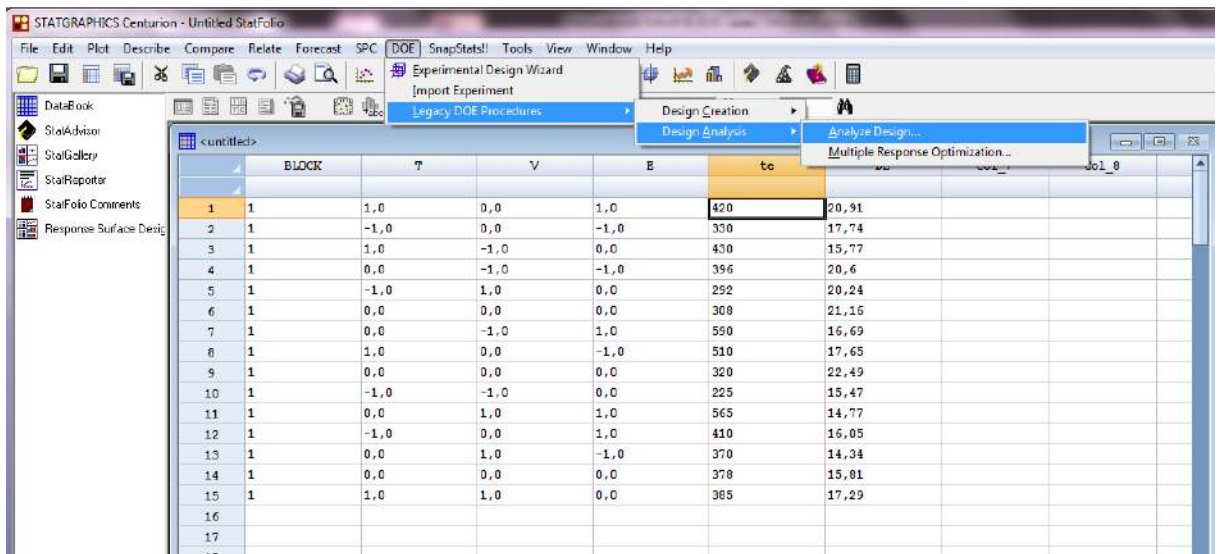
(c)



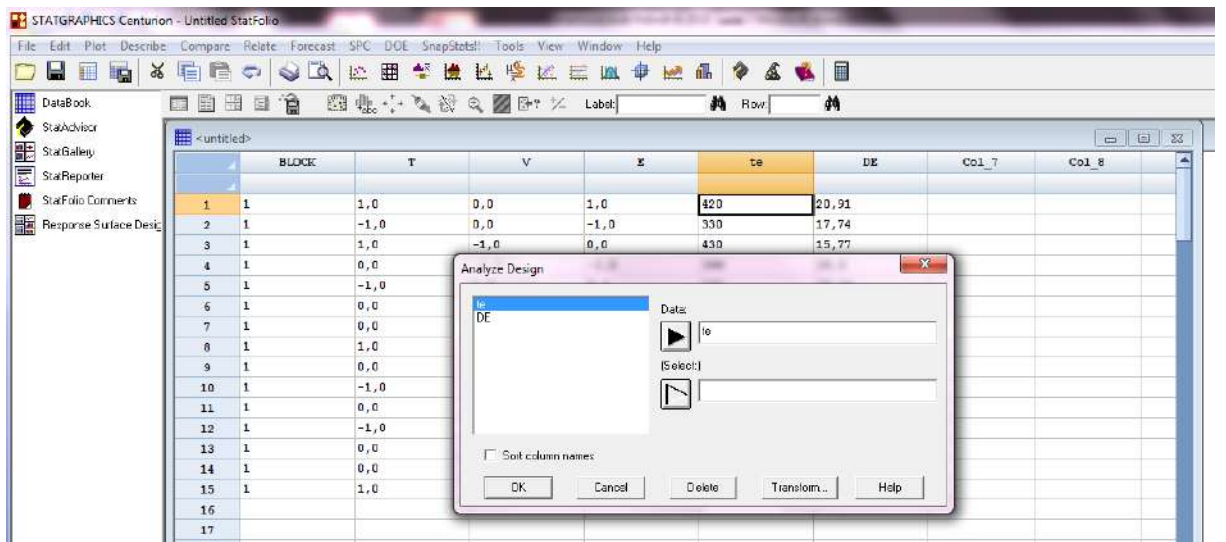
(d)



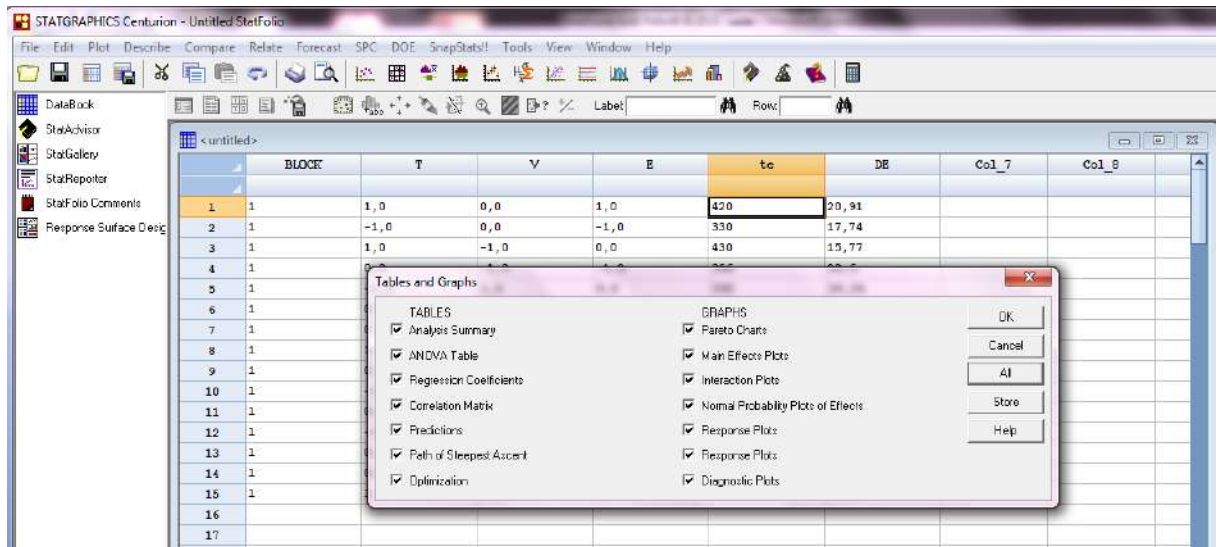
(e)



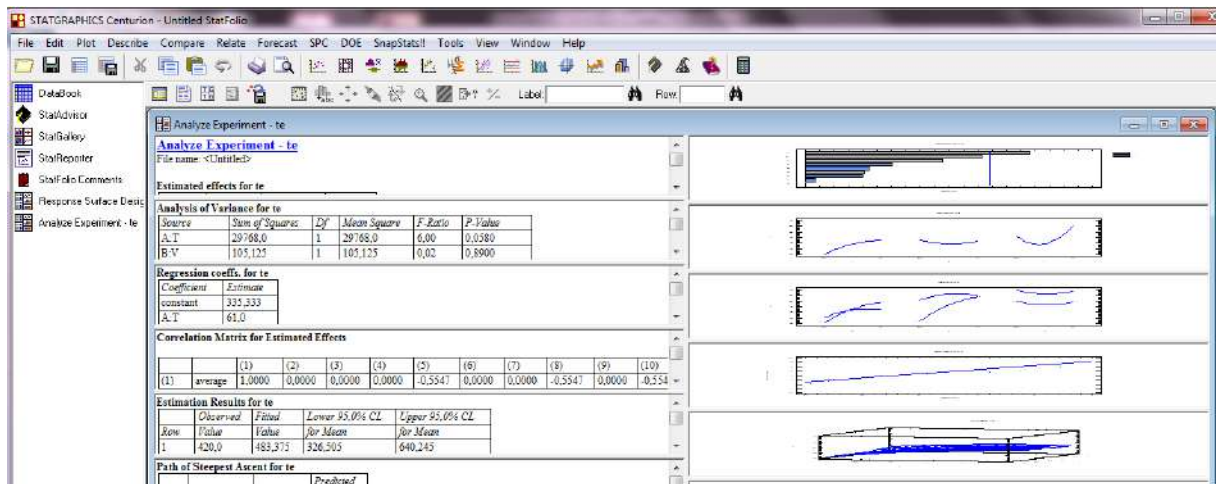
(f)



(g)



(h)



(i)

Figure A-6 (a,b .c.d.e.f.g.h.i) : les étapes de STATGRAPHICS