

REPUBLIQUE TUNISIENNE

Ministère de l'Agriculture, des
Ressources Hydrauliques et de la Pêche



Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique



Ecole Doctorale Sciences du Vivant et de l'Environnement

THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT

Spécialité : Génie Agro-Industriel

**Modélisation numérique et étude expérimentale du comportement
thermomécanique et rhéologique de pomme de terre**

Soutenue publiquement par : **Ltaief Lammari**

LE 24/09/22

ESIM Medjez EL Beb

Devant le jury composé de :

Président :	Khaled El Moueddeb, ESIM	Professeur
Rapporteur :	Rachid Nasri, ENIT	Professeur
Rapporteur :	Jamel Mejri, ESIM	Maitre de Conférences
Examineur :	Mourad Jridi, ISBB	Maitre de Conférences
Directeur de thèse :	Hassen Kharroubi, ESIM	Professeur
Invitée & Co-directrice:	Sana Ben Khelifa, ESIM	Maitre assistante (Habilitée)

REMERCIEMENTS

Je remercie les rapporteurs **Pr. Rachid Nasri** et **Mcf. Jamel Mejri** pour avoir accepté de rapporter ma thèse et dont les remarques et commentaires m'ont permis de corriger certaines erreurs et d'améliorer mon travail. Je suis honoré et lui exprime ma profonde gratitude à **Pr. Khaled El Moueddeb** président du jury de thèse.

Merci également à **Mcf. Mourad Jridi** pour sa collaboration durant l'examen de ce travail et sa participation à la soutenance.

Mes remerciements vont à mon directeur de thèse, **Pr. Hassen Kharroubi**, et ma co-directrice de thèse **MA. Sana Ben Khelifa** pour leur encadrement, leurs nombreux conseils et leur soutien constant tout au long de ma thèse. Ils ont su m'aider dans mes prises de décision, tout en m'accordant une large autonomie. Je remercie toute l'équipe de **l'Ecole Supérieurs des Ingénieurs de Medjez El Bab** pour leur amitié, leur aide et leurs échanges amicaux pendant ces années de thèse.

Merci à l'université de **Jendouba** et **l'IRESA** pour le bon accueil.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé à un moment ou à un autre à la réalisation de ce projet (**ISSET EL KEF**).

Et finalement, un grand merci à toute ma famille qui a toujours été là pour me soutenir et m'encourager et particulièrement mes chères **Khadouja** et **Teija**.

Résumé

L'étude du comportement thermomécanique et rhéologique d'un produit agricole et de ses caractéristiques viscoélastiques par EF à travers l'outil de simulation numérique doit être basée sur les résultats des essais expérimentaux mécaniques et thermiques classiques.

L'objectif de ce travail est principalement de déterminer l'évolution des propriétés mécaniques et thermiques qui ont un impact direct sur la vitesse de vieillissement.

Le comportement viscoélastique de ce produit a été justifié à travers un essai de fluage après la fixation des conditions aux limites imposées permettant de déterminer des paramètres quantitatifs (élastiques, viscosité dynamique η_1 , η_2 , E_1 , E_2).

Ces résultats consistent à limiter les charges maximales afin d'augmenter la résistance de la pomme de terre contre les endommagements et pour améliorer le rendement du produit dans les phases de récolte, de transport et de stockage.

LISTE DES ABREVIATIONS

- (D) : Diamètre de la matrice (mm)
- (Mw) : Teneur moyenne de l'eau des fruits et légumes (%)
- (R_u, R'_u) : Rayons de courbure de la surface convexe de l'échantillon au point de contact avec la plaque supérieure (mm)
- (R_i, R'_i) : Rayons de courbure de la surface convexe de l'échantillon au point de contact avec la plaque inférieure (mm)
- (ΔL) : Allongement (mm)
- (L0) : Longueur d'origine (mm)
- (P) : La porosité
- (L) : Longueur (mm)
- (W) : largeur (mm)
- (T) : Epaisseur (mm)
- (Dg) : Le diamètre moyen géométrique (mm)
- (Da) : Le diamètre moyen arithmétique (mm)
- (Ø) : La sphéricité
- (S) La surface spécifique (mm²)
- (X) : Epaisseur (mm)
- (Vsp) : Volume d'un sphéroïde aplati (mm³)
- (D) : Coefficient de diffusion (m².s⁻¹)
- (i) : indice de variation de temps
- (j) : Indice de variation de distance
- (Ci) : Capacité calorifique spécifique des composants alimentaires (J .K⁻¹ .kg⁻¹)
- (h) : Discrétisation suivant l'axe de temps (pas)
- (hx) : Discrétisation le long de l'axe des longueurs (un pas)
- (ws) : Fraction massique des solides dans l'aliment
- (wi) : Fraction massique des composants alimentaires
- (De) : Le nombre de Deborah
- (T) : Capacité évaluée par le pourcentage de quantité de tamisage du sol
- (X_k^v) : La fraction volumique du i^{ème} composant
- (X_k^w) : La fraction massique du i^{ème} composant

NOMENCLATURE

- (T): Température ($^{\circ}\text{K}$)
- (t): Temps (s)
- (Ve): Volume d'un ellipsoïde (mm^3)
- (E): Module Young (MPa)
- (F): Force, Charge (N)
- (k): La conductivité thermique du matériau ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
- (μ): Le Coefficient De Poisson
- (k_0): La conductivité thermique à température nulle ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)
- (β): Coefficient de température
- (Q): Flux de chaleur (W.m^{-2})
- (h): Le coefficient de convection ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
- (X_{vi}): La quantité volumétrique de chaque composant
- (Cp): La capacité thermique spécifique
- (σ): la contrainte normale (MPa)
- (τ): Contrainte de cisaillement (MPa)
- (G): Le module de cisaillement (MPa)
- (K): Module d'élasticité isostatique (MPa)
- (σ_E): Contrainte de la résistance du ressort
- (σ_{EL}): Contrainte de la résistance de l'amortisseur
- (ε_{E1}): Déformation instantanée
- ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$): Déformation (résiduelle plastique, élastique retardée)
- (E_1, E_2): les modules d'élasticité des éléments élastiques (MPa)
- (η_1, η_2): viscosité dynamique (Pa .s)
- (ρ_{ap}): La masse volumique apparente (kg.mm^{-3})
- (ρ_r): La masse volumique réelle (kg.mm^{-3})
- (ρ_i): Les masse volumiques de chaque constituant (kg.m^{-3})
- (α, β): Angles (rd)
- (δ_m): Masse de terre tamisée (kg)
- (ζ): Temps de séparation (s)
- (S): L'aire de la surface de séparation (m^2)
- (M): Masse de terre entrant dans le tamis (kg)

LISTE DES TABLEAUX

Tableau : 1 Compositions De Pomme De Terre	10
Tableau : 2 Les Essais Typiques Utilises Pour Determiner Le Module D'elasticite	16
Tableau : 3 Les Methodes De Calcul Du Module D'elasticite Des Produits Agricoles Selon La Theorie D'hertz	17
Tableau : 4 Methodes Et Theorie Utilisees Pour La Determination Du Module D'elasticite.....	19
Tableau : 5 Caracteristiques Physiques Du Tubercule De Pomme De Terre (100 Echantillons De Chaque Type).....	27
Tableau : 6 Dimensionnement De L'etuve	36
Tableau : 7 Les Parametres De Transfert De Chaleur (Pour Le Spunta)	41
Tableau : 8 Les Parametres De Transfert De Chaleur (Pour Le Daïla).....	41
Tableau : 9 Conditions Aux Limites De Probleme	44
Tableau : 10 Comportements Mecaniques Des Eprouvettes Etudiees.....	74
Tableau : 11 Constante De Materiau Determinee A Partir De La Courbe D'essai De Simulation De Fluage. (T=25°C)	75
Tableau : 12 Constante De Materiau Determinee A Partir De La Courbe D'essai De Simulation De Fluage. (T=46°C)	76
Tableau 13 Comportement Mecaniques Des Eprouvettes Etudiees.....	77
Tableau 14 Comportement Mecaniques Des Eprouvettes Etudiees.....	86
Tableau : 15 Variation De La Teneur En Eau Du Sol	86
Tableau 16 Masse Volumique Apparente (Spunta).....	87
Tableau : 17 Determination Des Proprietes, De La Masse Volumique Apparente(Daïfla)	87
Tableau : 18 Calcul Des Differences Divisees Pour Spunta W5	90
Tableau: 19 Calcul Des Differences Divisees Pour Spunta W6	90
Tableau : 20 Calcul Des Differences Divisees Pour La Daïfla W5	91
Tableau : 21 Calcul Des Differences Divisees Pour Daïfla W6	91

LISTE DES FIGURES

Figure : 1 différentes périodes de croissance de la pomme de terre	6
figure : 2 schéma de la coupe transversale d'un tubercule de pomme de terre.....	7
figure : 3 à partir d'un tubercule plante, on peut obtenir cinq, dix ou quinze nouveaux tubercules	8
figure : 4 essai de traction d'un échantillon de pomme de terre	15
figure : 5 diagrammes des comportements viscoélastiques de charge-déformation (a) un essai de fluage (contrainte appliquée constante), (b) un essai de relaxation des contraintes (déplacement est appliqué à vitesse constante).....	22
figure : 6 positionnements des trois axes de mesure de la pomme de terre.....	24
figure : 7 détermination de la masse volumique	25
figure : 8 la morphologie des deux variétés étudiées (spunta, daifla)	26
figure : 9 transfert de chaleur en régime permanent à travers le corps	32
figure : 10 un cube pour l'analyse du transfert de chaleur	33
figure : 11 distribution de la température	35
figure : 12 l'évolution de la température en fonction du coefficient β	36
figure : 13 fixation de l'éprouvette.....	36
figure : 14 configuration expérimentale	37
figure : 15 variation de la température en fonction du temps le long des directions longitudinale (spunta)	38
figure : 16 variation de la température en fonction du temps le long des directions longitudinales (daifla).....	39
figure : 17 évolution du taux de chaleur selon les deux directions : longitudinale et transversale de la pomme de terre spunta et daifla.....	40
figure : 18 morphologie de la pomme de terre.....	42
figure : 19 modélisation numérique de l'évolution de la température en fonction du temps ($y=0$; $x=50\text{mm}$) (rdm6).....	48
figure : 20 types de conditions aux limites.	49
figure : 21 la variation des contraintes sous l'effet de température	50
figure : 22 distribution de la température dans une pomme de terre en (2d) après 1 heure.....	51
figure : 23 la célérité de température dans la pomme de terre	51
figure : 24 les directions des flux thermiques	52
figure : 25 la variation de température de la phase transitoire juste à la phase stationnaire.....	52
figure : 26 contrainte normale de traction et de compression et de cisaillement	55
figure : 27 dimensionnement de l'éprouvette, $l=80\text{mm}$, $s=160\text{mm}^2$	57
figure : 28 préparation de l'échantillon, et fixation des conditions de l'essai	58
figure : 29 fixation de l'éprouvette et déroulement de l'essai de traction.....	59
figure : 30 courbe contrainte – déformation obtenue à partir de la texture daifla	59
figure : 31 courbe contrainte – déformation obtenue à partir de la texture spunta.....	59
figure : 32 essais cycliques de chargement et de déchargement d'une éprouvette de pomme de terre (spunta)	60
l'échantillon est soumis à une boucle d'hystérésis pendant le chargement et le déchargement cyclique (figure 33). La perte d'énergie est due à la composition moléculaire influencée par la contrainte durant le chargement et le déchargement de l'éprouvette dans la zone élastique. Ce comportement observé confirme la nature viscoélastique de la pomme de terre.	60
figure : 34 le choix de position de l'éprouvette.....	61
figure : 35 courbe contrainte – déformation obtenue à partir.....	61
figure : 36 réponses des matériaux à une vitesse de déformation constante	62
figure : 37 réponse de pommes de terre au chargement et déchargement	64
figure : 38 modèle de Maxwell	65

figure : 39 (a) le ressort presente le comportement elastique.....	65
figure : 40 modele de kelvin - voight.....	66
figure : 41 le modele burger etait compose.....	67
figure : 42 le comportement correspondant au temps de deformation viscoelastique du modele burger.....	69
figure : 43 les conditions aux limites.....	72
figure : 44 maillage de l'eprouvette.....	72
figure : 45 visualisation des resultats en fonction du temps.....	73
figure : 46 fluage et recuperation de pomme de terre pour un modele de burgers (t=7°C).....	74
figure : 47 fluage et recuperation de pomme de terre pour un modele de burgers (t=25°C).....	75
figure : 48 fluage et recuperation de pomme de terre pour un modele de burgers (t=46°C).....	76
figure : 49 l'effet de la temperature sur la variation des viscosites.....	78
figure : 50 etapes de croissance de la pomme de terre - processus de plantation - diagrammes du cycle de vie des plantes...	82
figure : 51 le defanage des pommes de terre	83
figure : 52 modelisation du systeme de criblage.....	85
figure 53 evolution de la charge en fonction du % de la teneur en eau dans le sol (spunta) (%swc).....	88
figure 54 evolution de la charge en fonction du % de la teneur en eau dans le sol (daifla) (%swc).....	89
figure : 55 evolution de la charge en fonction du % de la teneur en eau du sol.....	92

TABLE DES MATIERES

Introduction Generale	1
Chapitre 1 : Structure Et Proprietes	3
Physico-Mecaniques De La Pomme De Terre	3
1 Introduction	3
1.1 Mise En Situation	3
1.2 Impact Economique La De Pomme De Terre En Tunisie	4
1.3 Formation Et Composition Du Tubercule	5
1.4 Temps D'evolution De La Pomme De Terre	6
1.5 Pommes De Terre De Semence	8
2 Morphologie Et Composition	9
2.1 Composition De La Pomme De Terre	9
2.2 Texture Des Produits Alimentaires	10
2.3 Principes De Base	11
3 Identification Des Comportements Par Des Essais Experimentaux	12
3.1 Proprietes Mecaniques	12
3.2 Les Essais Mécaniques	13
3.2.1.1 La Théorie De Hooke	14
3.2.1.2 Théorie D'hertz	16
3.2.1.3 Théorie De Boussinesq	18
3.2.1.4 Coefficient De Poisson	19
3.3 Amortissement Mécanique	20
4 La Rheologie De La Pomme De Terre	20
4.1 Modélisation Rhéologique	21
4.1.1 Essais De Fluage	22
4.1.2 Essais De Relaxation	22
5 Proprietes Thermiques :	22
6 Proprietes Physiques Des Tubercules De Pomme De Terre	24
6.1 Matériels Et Méthodes	24
6.1.1 Présentation Des Paramètres Mesurés	24
6.1.2 Resultats Et Discussions	26
7 Conclusion	28
Chapitre 2 : Propriétés Thermiques	29
1 Introduction	29

2	Les Proprietes Thermiques	29
2.1	<i>Estimation De La Conductivité Thermique Des Produits Alimentaires</i>	30
2.2	<i>Loi De Fourier Sur La Conduction De Chaleur</i>	31
3	Détermination Expérimentale De La Conductivité Thermique De Pomme De Terre	34
3.1	<i>Matériels Et Méthodes</i>	34
3.1.1	Méthode Théorique	34
3.1.1.1	Conduction En Régime Permanent Sans Dissipation Thermique Interne	34
3.1.2	Conditions Aux Limites Et Hypothèses	35
3.1.3	Methode Exprementale	36
3.1.3.1	Protocole Expérimental	36
3.1.3.2	Les Conditions D'essai Réalisées Sont :	38
3.1.3.3	Résultats Et Discussions	38
4	Modélisation Numérique Du Transfert De Chaleur Dans Les Pdt	42
4.1	<i>Méthodes Des Différences Finies (Fd)</i>	42
4.1.1	Capacité Thermique	44
4.2	<i>Méthodes Des Eléments Finis (Fe)</i>	45
4.2.1	Formulation Numérique Du Problème Thermique	45
4.2.2	Détermination Des Propriétés Thermiques	46
4.2.2.1	Conditions Aux Limites	46
4.2.2.1.1	Dirichlet – Valeurs Aux Bords	47
4.2.2.1.2	Neumann – Gradients Aux Bords	47
4.2.2.1.3	Robin – Relation Gradient/Valeurs Sur Le Bord	47
4.2.3	Résultats Et Discussion Des Simulations Unidirectionnelle 1d	47
4.2.4	Formulation Fem Pour Les Problèmes Bidimensionnels 2d	48
4.2.5	Formulation Faible	49
4.2.6	Résultats Et Discussion Des Simulations Bidirectionnelles 2d	50
5	Conclusion	53
	Chapitre 3 : Comportement Mecanique	54
	Et Rheologique Depomme De Terre	54
1	Introduction	54
2	Comportement Mecanique	54
2.1	<i>Relation Entre Les Propriétés Mécaniques :</i>	55
3	Matériels Et Méthodes	56
3.1	<i>Essais Expérimentaux</i>	56
3.1.1	Essai De Traction	57
3.1.1.1	Résultats Et Discussions	58
3.1.2	Essai De Compression	60
3.1.2.1	Préparation De L'éprouvette Pdt	60
3.1.2.2	Résultats Et Discussions	61
4	Comportement Rheologique Des Materiaux	62
4.1	<i>Comportement Mécaniques Des Aliments Solides</i>	63

5	La Viscoelasticite	63
5.1	<i>Modèles Mathématiques Pour La Réponse Viscoélastique Linéaire</i>	64
5.1.1	Matériels Et Méthodes	64
5.1.1.1	Le Modèle Maxwell :	64
5.1.1.2	Modèle De Kelvin - Voight	65
5.1.2	Critères De Choix Du Modèle Etudié	67
5.1.3	Etude Du Mécanisme Du Modèle Rhéologique Choisi	67
5.2	<i>Approche Par Eléments Finis</i>	70
5.2.1	Simulation Numerique	71
5.2.2	Analyse Du Probleme	71
5.3	<i>Résultats Et Discussion</i>	73
6	Conclusion	78
Chapitre 4 : Determination Des Forces Necessaires Pour Disloquer Les Pommes De Terre De L'argile		80
1	Introduction	80
2	L'importance De Cultiver Les Pommes De Terre	80
3	Evaluation Et Etapes De Production	81
3.1	<i>Séparation De La Pomme De Terre De L'argile</i>	81
3.2	<i>Profondeur De Plantation</i>	81
3.3	<i>Distance De Plantation</i>	82
3.4	<i>Le Défanage Des Pommes De Terre</i>	83
4	La Recolte	83
4.1	<i>Matériels Et Méthodes</i>	84
4.1.1	Formulation Théorique De Problème	84
4.1.2	Validation Des Paramètres Mécaniques D'éprouvette	85
4.2	<i>Résultats Et Discussion</i>	86
4.2.1	Résultats	86
4.3	<i>Interprétation :</i>	92
5	Conclusion :	93
Références Bibliographiques :		96

INTRODUCTION GENERALE

L'étude des propriétés thermiques et mécaniques des produits agricoles fait l'objet des débats critiques depuis de nombreuses années et a attiré l'attention de nombreux chercheurs. Les propriétés thermiques et mécaniques des produits agricoles sont parmi les facteurs les plus importants dans la conception des machines agricoles, des systèmes de criblage, des processus de transport, des systèmes de traitement et de conditionnement, des méthodes et des conditions de stockage et bien sûr lors de la transformation industrielle. La pomme de terre est l'un des produits agricoles les plus importants comme étant une source de nourriture. L'objectif de ce travail est d'identifier ces caractéristiques et d'étudier le comportement de la pomme de terre en raison de leur importance et de l'insuffisance des informations actuelles les concernant. Les essais qui ont été appliqués sur la pomme de terre afin d'extraire les informations et déduire les comportements ont été faits dans des conditions standards des éprouvettes. Les approches de cette étude : la longueur, la largeur, l'épaisseur, le diamètre moyen géométrique et le diamètre arithmétique, la sphéricité, la surface, la masse, le volume, la masse volumique apparente et la masse volumique réelle sont basés sur des essais expérimentaux et validés par le support de la modélisation par éléments finis, avec une recherche bibliographique à comparer avec les résultats déjà trouvés.

L'étude s'étend sur quatre chapitres qui seront répartis comme suit : dans le premier chapitre, une recherche bibliographique détaillée sur les propriétés générales de la composition de la pomme de terre et les propriétés physiques consolidées par des essais expérimentaux. Ces propriétés nous permettent d'extraire un maximum de données qui soutiendront notre recherche afin d'alimenter la modélisation numérique. L'importance de ce produit nous oblige à détailler les étapes de production, de chercher leurs propriétés thermiques, les équations adéquates et les différents essais menés dans ce type de problème surtout que ces matériaux agricoles ont des méthodes de caractérisation différentes.

Il est alors nécessaire de mettre au clair plusieurs aspects indispensables pour l'étude, le comportement mécanique et rhéologique, les essais classiques sur les matériaux de différentes natures : matériaux visqueux et modèles élastiques utilisés, l'interprétation et l'identification de différents critères trouvés afin d'examiner l'efficacité de la méthode employée et son effet sur les résultats trouvés.

La deuxième partie traite le comportement thermique des pommes de terre à travers des essais pratiques. En réalisant un banc d'essai spécifique constitué d'une étuve, d'un support adiabatique et des thermomètres scientifiques. Les résultats obtenus ont été comparés aux précédentes études et ils seront validés à l'aide de l'outil « éléments finis ». La description des matériaux utilisés a été faite par l'interprétation des résultats et les propriétés thermiques trouvées.

Le troisième chapitre illustre le comportement mécanique de la pomme de terre à travers des essais classiques de traction et compression faits sur une machine de traction numérique. Par suite, les résultats obtenus seront validés par des modèles empiriques. C'est trouvés seront utilisés par la suite pour étudier le comportement viscoélastique : la rhéologie de la pomme de terre. Après avoir fixé les conditions aux limites, des essais de fluage vont être modélisés afin de caractériser les paramètres mécaniques et rhéologiques de PDT. Le taux de réponse de ces matériaux influencés par plusieurs paramètres rencontrés pendant le cycle de production essentiellement la récolte et le transport.

Les données trouvées prouvent l'importance d'un bon stockage qui, après, va garantir une certaine fraîcheur et une bonne qualité nutritive des pommes de terre. Il faut toujours prendre en considération qu'avec le temps, le facteur de vieillissement va se manifester, surtout que ce produit a aussi une valeur industriellement importante.

Dans le chapitre quatre, une étude expérimentale a été menée sur la force mécanique capable d'extraire les pommes de terre du sol en variant la quantité d'eau présente. Un banc d'essai spécialement conçu pour cette étape permet aussi de chercher la densité pour chaque mesure.

Les résultats thermiques et mécaniques trouvés, ont été explicitement définis et validés par une simulation numérique pour chaque modèle. Ces résultats sont capables d'optimiser l'énergie tout au long du cycle de vie des pommes de terre.

Chapitre 1 : STRUCTURE ET PROPRIETES

PHYSICO-MECANIKES DE LA POMME DE TERRE

1 INTRODUCTION

La pomme de terre, de son nom latin est *Solanum Tuberosum* fait partie de la famille des morelles. Historiquement, l'origine de la pomme de terre vient directement de l'Amérique Latine et depuis lors elle a connu un grand développement et se décline en un grand nombre de différentes variétés. Dans le cadre de la poursuite de grandes découvertes, les Espagnols ont ramené ce légume en Europe : il fut surtout adopté vers les années 1570 lorsque l'Europe a été attaquée par les guerres et les famines. Aujourd'hui, dans le monde entier, la pomme de terre est le troisième produit le plus consommé, notamment après le riz et le blé.

Ce chapitre présente le cycle de production de la pomme de terre. Il donne une idée sur sa morphologie et sa composition physico-chimique, une détermination des propriétés physiques et des lois utilisées afin d'identifier le comportement mécanique et finira par présenter les différentes propriétés thermiques.

1.1 Mise en situation

Ce produit agricole est cultivé dans plus que 95 pays, sur une superficie totale qui dépasse les 19 millions d'hectares. Les pommes de terre fournissent une offre mondiale de 370 millions de tonnes. (Hirsch et al, 2013). C'est l'un des légumes les plus cultivés au monde. La Chine est le premier producteur, après vient de l'Inde et la Russie. Cela peut s'expliquer par la facilité et la méthode technique de production avec son faible coût et surtout que ce produit s'adapte bien facilement dans quasiment tous les milieux et dans tous les climats.

Aujourd'hui, les consommateurs l'utilisent souvent sous forme de dérivés, comme les chips, ainsi qu'elles peuvent être préparées différemment et que chaque plat, indépendamment, garde les grandes valeurs nutritives que le corps humain en besoin. (Hussain, 2016 ; Sarangi et al, 2021).

En Tunisie, la pomme de terre est devenue un produit alimentaire stratégique et fait partie de la tradition nutritionnelle. Elle est, économiquement parlant, très rentable est très importante sachant que la consommation annuelle par habitant dépasse actuellement 30 kg selon les statistiques de la FAO (30 kg / personne / an), sauf qu'il existe des défis à surmonter en raison de carences scientifique, techniques et climatiques, en l'absence d'une transformation

industrielle pouvant accompagner la recherche dans le but d'une valorisation totale de ce produit (Fuglie, 1994 ; Blom-Zandstra et al, 2018).

1.2 Impact économique la de pomme de terre en Tunisie

Le secteur de la production de la pomme de terre est important en Tunisie. Elle est la deuxième culture du pays après les tomates et c'est un aliment de base de l'alimentation tunisienne. En Tunisie, en se basant sur des études bibliographiques et des entretiens avec les acteurs majeurs du secteur de la production des pommes de terre et validé par des enquêtes, la grande partie de la production est destinée vers la consommation directe, mais la production industrielle basée sur ce produit est presque nulle (Blom-Zandstra et al, 2018) bien que si les pommes de terre étaient bien exploitées dans l'industrie alimentaire, on aurait réussi à créer plus de fortune et plus d'offres d'emploi, bien évidemment après plus de recherche orientée.

Environ 27 000 hectares en Tunisie sont consacrés aux cultures de pommes de terre, ce qui signifie que la Tunisie produit en moyenne 440 000 tonnes de pommes de terre par an (Chebbi et al, 2019) il représente environ 17% des terres cultivées et se situe principalement à Nabeul, Bizerte, Jendouba, Gafsa, Beja, Siliana, Kasserine et Sidi Bouzid (Hlaoui et al, 2020).

Les dates de plantation de la pomme de terre sous le climat tunisien varient selon la zone géographique, et ces dates peuvent se résumer comme suit :

Zones côtières : Les pommes de terre sont plantées tout au long de la période de fin août à fin janvier,

Dans les zones adjacentes à la mer, quatre types de culture peuvent être utilisés :

L'autre plantation est saisonnière, où la pomme de terre dite hibernante : sa période de plantation s'étend de fin août à mi-octobre.

Semis précoce : de mi-octobre à fin novembre.

Plantation au début du printemps : de début décembre à mi-janvier.

Plantation saisonnière : de mi-janvier à fin février.

Les zones intérieures : Le climat oblige les agriculteurs à utiliser deux types de cultures tout au long de la période de fin août à fin février.

L'autre plantation est saisonnière : de fin août à fin septembre.

Plantation saisonnière : pendant tout le mois de février.

La pomme de terre est cultivée dans de différentes conditions climatiques, même les plus arides. C'est une plante qui donne bien dans des conditions de température entre 16 et 21 degrés Celsius donc les régions côtières sont considérées comme les zones de production les plus importantes en Tunisie.

Sol : La pomme de terre préfère les sols légers, organiques, fertiles et très perméables, à faible acidité (pH=7), ni calcaires ni caillouteux, ou les sols argileux qui ne sont pas difficiles à infiltrer dans l'eau et l'air ne bouge pas vite. La culture des pommes de terre nécessite un labour profond entre 35 et 50 cm.

89 % de la superficie est équipée d'un système d'irrigation goutte à goutte, et la moitié des champs sont récoltés manuellement. Production annuelle moyenne de 18 à 20 tonnes/ha, production standard (15 tonnes/ha en 2014), aussi et par conséquent, l'importation de semence entraîne une instabilité des prix du marché qui affectera sa contribution à la production agricole totale, reste à dire que les principales variétés connues en Tunisie sont Spunta, Daifla, Bellini et Nicola ([Blom-Zandstra et al, 2018](#)).

Spunta présente 80% de la production nationale : c'est à variété la plus consommable par les tunisiens.

Daifla : c'est la variété la plus consommé du reste des pommes de terre cultivés.

1.3 Formation et composition du tubercule

Des millions d'agriculteurs dans le monde dépendent de la pomme de terre (*solanum tuberosum*) pour améliorer leurs moyens d'existence. Les récentes incertitudes concernant l'offre et la demande alimentaires mondiales ont placé la pomme de terre en haut de la liste des cultures recommandées pour la sécurité alimentaire. Cette dernière est une culture à fort potentiel de sécurité alimentaire en raison de sa capacité à fournir une culture de haute qualité par unité d'intrant avec un cycle de rendement plus court ([Adane et al, 2010](#)).

C'est un élément important de l'alimentation d'un demi-milliard de consommateurs dans les pays en développement ([Mondal, 2003](#)). La pomme de terre est une culture vivrière et commerciale importante, jouant un rôle majeur dans la sécurité alimentaire nationale et la nutrition, la réduction de la pauvreté et la création de revenus, et elle fournit des emplois dans les secteurs de la production, de la transformation, des sous-secteurs et de la commercialisation. La variation des cultures est le résultat d'une combinaison de facteurs génétiques et environnementaux. La différence est due à la source du choix des variétés.

La pomme de terre peut être utilisée comme nourriture ou comme fourrage, et elle a également un potentiel industriel sous forme de transformation des aliments, utilisant des pommes de terre pour produire des frites, des croustilles et des pommes de terre en conserve tandis que les industries non alimentaires utilisent des pommes de terre pour produire de l'amidon, de l'alcool, etc ([Struik and Wiersema, 1999](#); [Khurana et al, 2003](#)).

1.4 Temps d'évolution de la pomme de terre

La formation des tubercules commence lorsque les plantes mesurent de 15 à 20 cm, soit cinq à sept semaines après la plantation, et résulte de la production et le mouvement de l'amidon dans le développement tubercules (Zarka et al, 2014). La période de maturation des pommes de terre de semence, les variétés précoces est de 70 à 90 jours, les variétés de mi-saison de 90 jours généralement la maturation à 120 jours et suivant les variétés tardives de 120 à 140 jours après la plantation selon le type de fruits.

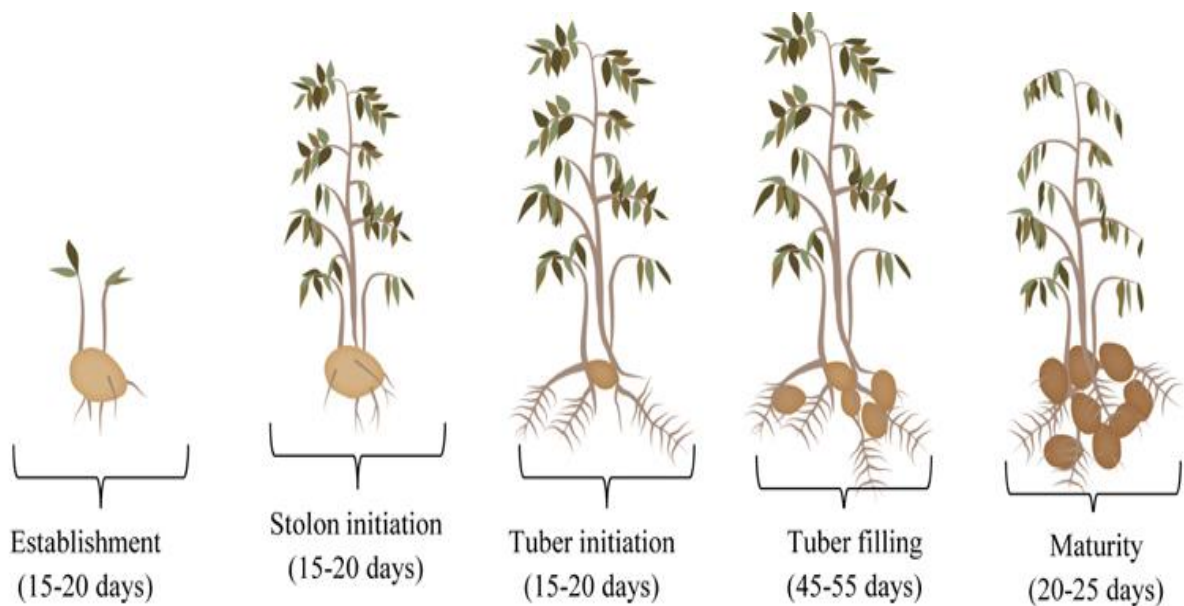


Figure : 1. Différentes périodes de croissance de la pomme de terre (Obidiegwu et al, 2015)

La nature du sol, les taux de fertilisation et l'irrigation des cultures de pommes de terre jouent un rôle dans le développement des plantes.

Cette période peut diminuer à environ deux mois dans le cas de la culture à domicile, ce qui signifie que la première étape de la culture de la pomme de terre est l'étape de la formation des tubercules et varie entre 5 et 7 semaines.

Dans ce cas, la question c'est qu'il vaut la peine de prêter attention au niveau d'irrigation. Puis, l'humidité du sol doit également être maintenue en dessous (Figure1).

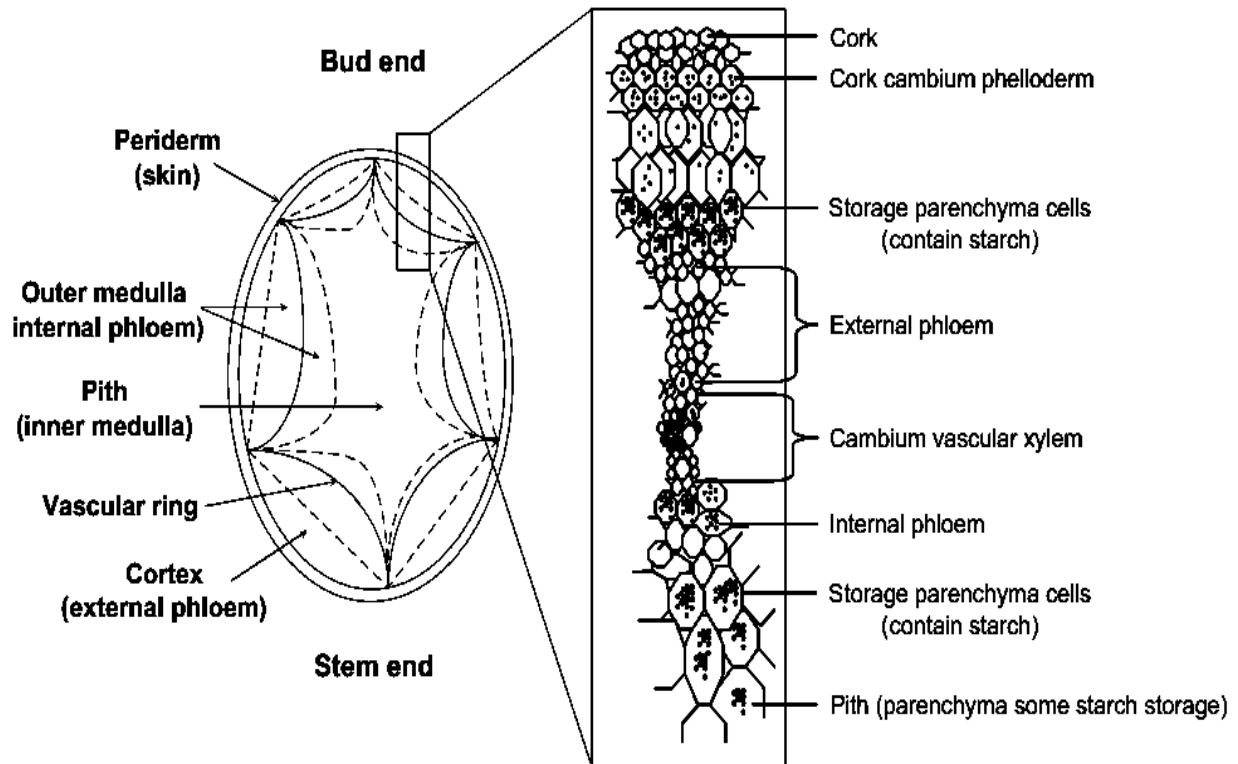


Figure : 2 Schéma de la coupe transversale d'un tubercule de pomme de terre.
(Troncoso et al 2009)

Les tubercules sont des organes complexes composés de nombreux types de tissus, y compris un système vasculaire complexe, chacun ayant des fonctions et des propriétés différentes de celles des structures cellulaires et tissulaires (Figure 2) (Oey et al 2017).

Pendant la croissance de pomme de terre, un certain nombre de pousses latérales se forment sous le niveau du sol à la base de la tige principale. Ces tiges restent généralement sous le niveau du sol, et contrairement aux tiges au-dessus du sol, elles poussent principalement horizontalement. Pendant la croissance, un stolon horizontal commence à former à l'extrémité des tiges, des tubercules tout en dépendant de la variété (Figure 3).

L'uniformité de la forme des tubercules de nombreuses espèces de pommes de terre est déterminée non seulement par les caractéristiques variétales, mais aussi par l'espacement des plants, un espacement plus étroit des plants donne des tubercules plus uniformes.

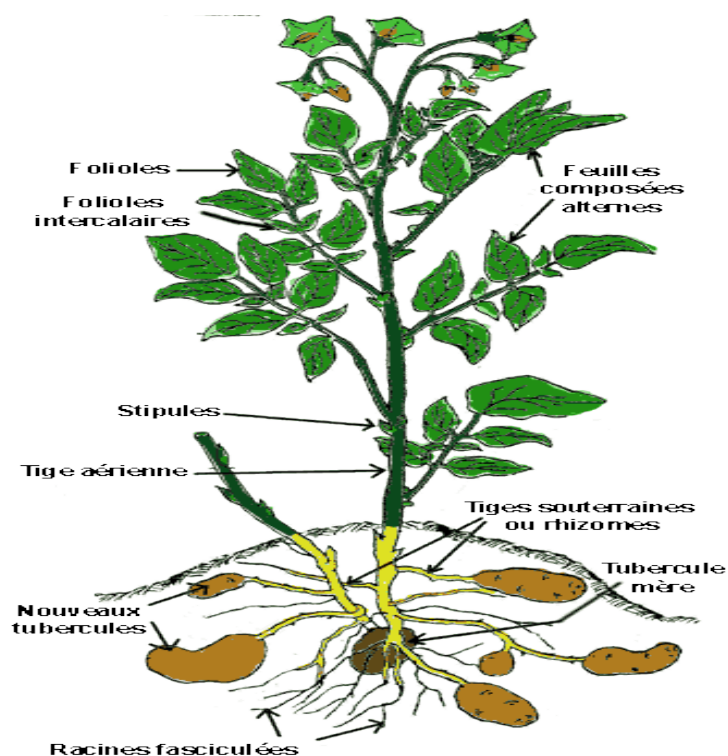


Figure : 3 À partir d'un tubercule planté, on peut obtenir cinq, dix ou quinze nouveaux tubercules (van der, 1973).

Lorsque les pointes des sommets jaunissent et que les tubercules se séparent facilement, cela signifie que la plante a mûri. Si les tubercules sont destinés au stockage et non à une consommation immédiate, ils sont laissés au sol jusqu'à ce que la couche externe durcisse, traitant ainsi les maladies liées au stockage et réduisant le volume résultant de la perte des tubercules.

1.5 Pommes de terre de semence

Contrairement aux autres grandes cultures de plein champ la pomme de terre est multipliée par voie végétative, ce qui signifie qu'une nouvelle plante peut être cultivée à partir d'une pomme de terre ou d'un morceau de pomme de terre, appelée « SEMENCE ». Par conséquent, la nouvelle plante peut produire 5 à 20 nouveaux tubercules, selon la qualité des tubercules récoltés - est mise de côté pour être réutilisée lors de la prochaine saison de semis, la plupart des agriculteurs des pays en développement sélectionnent et stockent leurs propres tubercules de semence (Forbes et al 2020).

2 MORPHOLOGIE ET COMPOSITION

2.1 Composition de la pomme de terre

Des études indiquent que les pommes de terre ont une valeur nutritionnelle importante, leur efficacité varie selon le type et la méthode de cuisson, tandis que les experts mettent en garde contre la friture, car elle augmente la quantité de calories et de graisses qu'elles contiennent. Une pomme de terre moyenne cuite contient 161 calories, 0,2 gramme de matières grasses, 4,3 grammes de protéines et 36,6 de glucides, un morceau de pomme de terre garantit au consommateur 28 pour-cent de la ration quotidienne de « vitamine C », 27 % de la ration quotidienne de potassium et 12 % de la ration quotidienne de magnésium (Spooner and Hetterscheid, 2006 ;Arvy and Gallouin, 2015) (voir tableau 1).

Les pommes de terre sont l'un des légumes les plus polyvalents. Bien que leur utilisation principale soit destinée à la nourriture, elle a également été utilisée historiquement pour sa valeur médicinale.

Les pommes de terre contiennent un certain nombre d'éléments nutritifs qui peuvent jouer un rôle dans la promotion de la santé et la réduction du risque de maladie chronique (Beals, 2019). Il reste à dire que le composant principal des pommes de terre est l'amidon, il faut donc dire que les pommes de terre crues ne sont pas comestibles. Ils sont utilisés cuisinés à partir de plats différents. Le moyen le plus simple est de cuisiner à l'eau ou à la vapeur.

Une autre façon complètement différente est de le faire frire dans de l'huile très chaude. Ce n'est pas toujours le cas. Les pommes de terre bouillies peuvent également être frites dans l'eau par la suite.

Les pommes de terre sont la source de nombreux produits industriels tels que les "chips", aussi peuvent également être une source de boissons fermentées et d'alcool.

Les pommes de terre sont une très bonne source de vitamine C. Elles sont également une bonne source de vitamine B6, de cuivre, de potassium, de manganèse et de fibres alimentaires. Le totale des lipides (TL) dans les pommes de terre représente environ 0,1-0,5 % du tubercule, la plupart des lipides sont situés dans la région entre la peau et l'anneau vasculaire du tubercule (Ramadan, 2016).

Donc, en conclusion, il y a quelques idées fausses courantes sur la pomme de terre, en termes de santé humaine, c'est un produit riche en vitamines et en énergie pour tous les âges, avec la simplicité de production et de préparation (Tableau 1) .

Tableau : 1 Compositions de pomme de terre

Pomme de terre cuite à l'eau (sans peau)			
Valeur nutritionnelle moyenne pour 100 g			
Eau	78 g	Vitamines	
Valeur calorique	85 kcals	Vitamine	B1 0,08 mg
Protides/Glucides/Lipides		Vitamine	B2 0,03 mg
Protides	2 g	Vitamine B3 ou PP	1,2g
Glucides	19 g	Vitamine B6	0,18 mg
Lipides	0,1 g	Vitamine B9	0,01 mg
Divers		Vitamine C	13 mg
		Vitamine E	0,1 mg
		Sels minéraux	
Fibres		Cuivre	0,09 mg
		Fer	0,4 mg
		Potassium	376 mg
		Magnésium	18,6 mg
		Manganèse	0,14 mg
Zinc		Zinc	0,28 mg

2.2 Texture des produits alimentaires

Les caractéristiques sensorielles des aliments sont l'une des principales raisons pour lesquelles les consommateurs choisissent leurs aliments. Les propriétés sensorielles des aliments peuvent être divisées en trois aspects : apparence, saveur et texture. Cependant, la saveur et la texture sont plus importantes dans les caractéristiques sensorielles des aliments. En fait, d'un point de vue nutritionnel, les aliments liquides appropriés qui n'ont pas besoin d'être mâchés peuvent satisfaire pleinement les besoins nutritionnels (Costell and Duran, 2002 ; Stewart et al, 2012).

Cependant, si une telle portion de nourriture est utilisée en continu, peu de gens seront satisfaits. Mordre et mâcher des aliments c'est ce que les humains font naturellement, ce qui est évident depuis l'enfance. Par exemple, une bague en caoutchouc ou en plastique peut répondre à ce besoin pour les bébés qui font leurs dents. Bien que la texture soit souvent considérée comme secondaire par rapport à la saveur lors de l'évaluation d'un produit, la texture fera pencher la balance pour le consommateur si la texture ne répond pas à ses attentes (Civille, 2011). En fait, pour beaucoup de texture, la qualité de l'aliment a été considérée comme négligée, mais au fil du temps, la complexité de son évolution et de sa réponse à l'environnement en termes de thermomécanique et de vitesse de vieillissement a été découverte (Kohyama, 2020). Cela s'est reflété dans les aliments mesurés et le niveau de satisfaction à l'égard des tests utilisés. La plupart des aliments sont mécaniquement très complexes :

- Le traitement mécanique des processus de transformation combine de nombreux processus que la science des matériaux doit séparer pour quantifier et comprendre.
- Les aliments dans leur cycle de vie changent continuellement leurs propriétés à mesure que la température, la teneur en eau, le pH, etc. changent (Kinsella, 1987).

2.3 Principes de base

Le tissu est dérivé du mot latin *textura*. La texture est avant tout le sens du toucher qui répond aux stimuli physiques résultant du contact direct entre une partie du corps et les aliments. Le toucher (tactile) est la principale méthode de détection des tissus, mais la kinesthésie (sens du mouvement et de la position) et parfois la vision (degré d'affaissement et d'écoulement) et le son (associé aux tissus fragiles) sont fragiles et fissurés pour évaluer la texture (Bourne, 2002 ; ISO SensoryAnalysis-Vocabulary, 1992) définit la texture comme «tous les attributs mécaniques, géométriques et de surface d'un produit perceptible par des moyens mécaniques, tactiles et, le cas échéant, visuels et les récepteurs auditifs. » Une autre définition de Szczesniak (Szczesniak, 2002) déclare que «la texture est l'aspect perceptif et fonctionnel des propriétés structurelles, mécaniques et de surface des aliments qui sont détectées par les sens de la vision, de l'ouïe, du toucher et du mouvement». Cependant, la texture des aliments a été définie par l'ISO dans son vocabulaire standard pour l'analyse sensorielle comme «toutes les propriétés structurelles et rationnelles (géométriques et de surface)».

Pour un produit alimentaire, il peut être perçu par la mécanique, le toucher et, le cas échéant, les récepteurs visuels et auditifs (ISO SensoryAnalysis-Vocabulary, 1992 ; Piana and al, 2004). On pense également que la texture doit être liée aux sensations qui se produisent lors de la transformation des aliments dans la cavité buccale.

Il mesure les propriétés mécaniques des aliments et leurs réactions aux forces appliquées lors de la mastication et de la manipulation. Il a récemment été suggéré que la texture inclut la rhéologie orale et la tribologie orale, selon cette théorie.

Les caractéristiques des tissus peuvent également être classées comme des tissus liés à la rhéologie d'origine de la déformation (élasticité, cohésion et rigidité) et à la texture liée au mouvement de surface relatif du ligament et ceux détectés par les mécanismes courants de rhéologie et de tribologie (tels que la glisse et la douceur) (Chen and Stokes, 2012).

Par conséquent, il est raisonnable de croire que la consistance des aliments comprend la chimie, la physique, la physiologie et la psychologie (Tunick, 2011).

D'après les descriptions précédentes, il est évident que le concept de texture d'un aliment a atteint un consensus sur les aspects suivants :

La texture est un groupe de propriétés produites par les structures alimentaires.

La texture n'est pas une caractéristique unique, mais un ensemble de nombreuses propriétés.

La texture appartient aux propriétés mécaniques ou rhéologiques des aliments, mais d'autres propriétés physiques des aliments ne sont pas incluses dans le concept Texture des aliments.

La texture est principalement au toucher, ce qui se produit généralement dans la bouche, mais parfois dans d'autres parties du corps, comme les mains, les yeux, etc...

Le concept de texture alimentaire a deux aspects :

* Le premier concerne les propriétés physiques, y compris le module de Young, la contrainte de cisaillement, la viscosité, etc.

* L'autre concerne les propriétés organoleptiques, en particulier le goût, la dureté, la mastication, le caractère collant, le caractère collant, etc.

En fin il y a des différents facteurs intervenants dans la définition de la texture : la variété, la maturité des tubercules, les conditions d'environnement, et les méthodes d'interaction entre la physique et le chimique.

3 IDENTIFICATION DES COMPORTEMENTS PAR DES ESSAIS EXPERIMENTAUX

3.1 Propriétés mécaniques

L'amélioration de la qualité des produits alimentaires nécessite la connaissance de différents produits tels que les fruits, les légumes et les céréales (Stroshine, 2004). Pendant ce temps, la détermination du module d'élasticité comme l'une des propriétés mécaniques les plus importantes des produits agricoles représentant la rigidité des tissus est d'un grand intérêt.

En effet ce paramètre ainsi que d'autres propriétés mécaniques, par exemple la contrainte de rupture par compression, la contrainte de rupture par traction, l'énergie de rupture, la fermeté, le coefficient de Poisson et la ténacité sont très importants dans la conception et l'amélioration des machines (Stroshine and Hamann, 1994). La relation entre la contrainte et la déformation fait l'objet d'une science connue sous le nom de rhéologie (Purkayastha et al, 1985). Nous définissons trois types idéaux de déformation :

- Déformation élastique : la déformation apparaît instantanément avec l'application de la contrainte et disparaît instantanément avec son élimination. Pour de nombreux matériaux, la déformation est proportionnelle à la contrainte, au moins pour des valeurs modérées de la déformation.
- Déformation plastique : la déformation ne se produit pas tant que la contrainte est inférieure à une valeur limite appelée limite d'élasticité. La déformation est permanente, c'est-à-dire que le corps ne retrouve pas sa taille et sa forme d'origine lorsque la contrainte est supprimée.
- Déformation visqueuse : la déformation (écoulement) se produit instantanément avec la contrainte d'application et elle est permanente. Le taux de déformation est proportionnel à la contrainte. Les types de contraintes sont classés en fonction de la direction de la force par rapport au matériau.

Les contraintes normales sont celles qui agissent dans une direction perpendiculaire à la surface du matériau, sont stressantes si elles se dirigent vers le matériau et tendues si elles s'en éloignent, les contraintes de cisaillement agissent dans une direction parallèle (tangentielle) à la surface du matériau.

L'augmentation de la tension d'un corps soumis à une contrainte constante s'appelle le fluage. La diminution de la contrainte au cours du temps, sous un chargement constant, s'appelle la relaxation.

Compte tenu de la complexité des morphologies des matériaux agricoles ainsi que les pommes de terre, trois théories existent pour examiner le comportement mécanique, mais si les résultats des essais de Hooke peuvent être comparés à ceux de Boussinesq et Hertz, les valeurs seront plus importantes.

3.2 Les essais mécaniques

Dans le domaine de la mécanique agricole, il existe un processus d'évaluation de la texture des aliments et des mesures automatisées permettent d'obtenir des paramètres plus intuitifs et quantifiables. Ces paramètres quantitatifs sont très importants pour l'évaluation et le contrôle

de la qualité, en particulier pour l'industrialisation et la normalisation de la production alimentaire. Par conséquent, des recherches approfondies ont été menées sur l'utilisation de mesures instrumentales pour mesurer les propriétés texturales des produits alimentaires (Bourne, 2002).

De nombreuses informations sont disponibles sur les mesures des propriétés des textures et ces essais peuvent être divisés en trois types de mesures, le premier type concerne les propriétés physiques de base telles que la taille, la forme, le volume, la porosité, la couleur, etc. L'obtention de ces propriétés peut être relativement simple et fournir des paramètres faciles à comparer entre différents produits alimentaires. Ils peuvent parfois être directement liés à la perception perceptive. Ces propriétés, qui sont généralement les propriétés physiques de base, sont régulièrement mesurées lors du contrôle de la qualité des aliments.

La seconde dépend de la déformation mécanique ou du comportement à l'écoulement en général. En fonction de la relation entre le taux de contrainte ou l'échelle, ces mesures comprennent un essai de contrainte ou de résistance à la traction des solides et un essai de rhéologie pour les semi-solides ou les liquides, en utilisant des forces soigneusement mesurées. L'essai peut être effectué en examinant la force et en mesurant la pression, ou en vérifiant la déformation et en mesurant la force requise. La résistance est mesurée en fonction de la déformation, de la température et /ou de la vitesse de déformation. L'ampleur de la force, de la pression et de la forme de la courbe, y compris la forme et la taille des pics et des creux, sont liées à différentes propriétés fondamentales et, dans certains cas, peuvent être directement liées. Le troisième type de mesure est spécifiquement conçu pour découvrir les propriétés physiques de la perception humaine des tissus.

Ces caractéristiques comprennent des dispositifs qui suivent le mouvement de la mâchoire ou mesurent l'activité nerveuse dans les muscles de la mâchoire et la corrélient avec les propriétés alimentaires et la réponse du consommateur.

3.2.1.1 La théorie de Hooke

Sur la base de la théorie de Hooke, une éprouvette cylindrique ou cubique du tissu homogène du produit est préparée, étirée ou comprimée uni axialement entre deux mâchoires jusqu'à un certain degré de déformation (cas d'une éprouvette de pomme de terre Figure 4).

Le module apparent de l'élasticité est la pente de la partie linéaire initiale de la courbe contrainte/déformation, avec une vitesse assez faible (quasi-statique) comme indiqué dans la

condition de linéarité, appelée loi de Hooke (Robert Hooke, 1635-1703, scientifique anglais) la loi est formulée dans l'équation. (1):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{S}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{F.L}{S.\Delta L} \quad (1)$$



Figure : 4 Essai de Traction D'un Echantillon De Pomme De Terre

Les propriétés mécaniques de la pomme de terre telles que le coefficient de Poisson, le module d'élasticité (E en MPa), la résistance à la compression et d'autres indicateurs peuvent être utilisés pour prédire l'étendue des endommagements. Pour être significatifs, ces indicateurs doivent être calculés dans le cas où le produit est encore frais, c'est-à-dire la zone élastique, la pente de la courbe contrainte – déformation (Hetzroni et al, 2011).

On peut conclure qu'avec les résultats trouvés dans la partie recherche, le choix des modèles adéquats en fonction des géométries, des dimensions et des tailles des produits cibles, est concluant, selon le type d'essais, la traction, la compression ou la flexion, avec des restrictions de fiabilité sur les machines utilisées.

Tableau : 2 Les essais typiques utilisés pour déterminer le module d'élasticité

Type D'essai	Matériaux Testés	Référence
Essai de compression	Pomme, pomme de terre, maïs, pêche, tomate, soja et blé	Arnold Et Mohsenin (1971), Shelef Et Mohsenin(1969), Fridley Et Coll (1968), Jindal Et Techasena (1985), Misra Et Young (1981), Arnold Et Roberts (1969)
Essai de traction	Cerise et tomate	Levin Et Coll. (1959), Huff (1967) Balastreire Et Coll.
Essai de flexion	Maïs et pois	(1982), Khzaie (2002)

3.2.1.2 Théorie d'Hertz

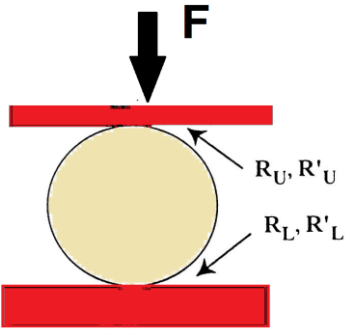
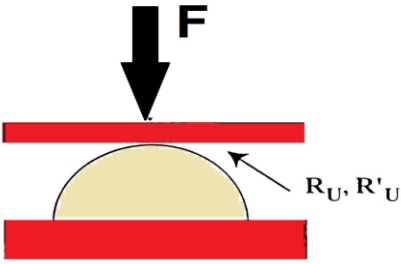
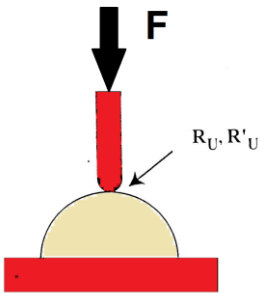
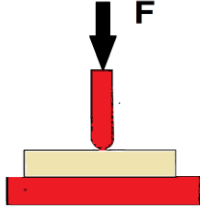
Dès 1881, Heinrich Hertz a formulé la relation entre la valeur de la charge de surface imposée et la pression de contact des surfaces à travers une approche basée sur les types de formes. La solution obtenue par Heinrich Hertz ne donne que les valeurs de direction des pressions de contact. Plus tard, de nombreux auteurs ont tenté de décrire la théorie de la pression de communication. Mais jusqu'ici aucune solution exacte n'a été trouvée pour le calcul des pressions de contact a fait plusieurs introductions simplifiées.

Les équations suivantes peuvent être utilisées pour estimer la valeur du module d'élasticité apparent, E, de matières alimentaires relativement solides et homogènes, ces équations sont basées sur les modèles d'Heinrich Hertz pour les contraintes de contact utilisées dans la mécanique solide. Les équations d'Hertz supposent que les déformations sont petites et le matériau compressé est élastique. Cependant, ils sont utiles pour faire des comparaisons du comportement de déformation de matériaux viscoélastiques lorsque les déformations et les taux de chargement sont similaires pour tous les échantillons testés (Mohsenin, 1986). Cette méthode a été utilisée pour le calcul du module E de pomme de terre (Finney and Hall, 1967).

Tableau : 3 Les méthodes de calcul du module d'élasticité des produits agricoles selon la théorie D'HERTZ

(Asabe standard, compression test of food materials of convex shape, asae s368.

4 dec2000, 2008)

Formule pour module d'élasticité (MPa)	Forme de chargement
$E = \frac{0.338F(1 - \mu^2)}{\varepsilon^{3/2}} \left[\left(K_U \left(\frac{1}{R_U} + \frac{1}{R'_U} \right)^{\frac{1}{3}} + K_L \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R'_L} \right)^{\frac{1}{3}} \right)^{\frac{3}{2}} \right]$	
$E = \frac{0.338 K_U^{\frac{3}{2}} F(1 - \mu^2)}{\varepsilon^{3/2}} \left(\frac{1}{R_U} + \frac{1}{R'_U} \right)^{\frac{1}{2}}$	
$E = \frac{0.338 K_U^{\frac{3}{2}} F(1 - \mu^2)}{\varepsilon^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{1}{R_U} + \frac{1}{R'_U} + \frac{4}{d} \right)^{\frac{1}{2}}$	
$E = \frac{0.338 K_U^{\frac{3}{2}} F(1 - \mu^2)}{\varepsilon^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{4}{d} \right)^{\frac{1}{2}}$	

Donc le module d'élasticité peut être calculé avec les quatre méthodes comme illustré dans Tableau 3, où :

K_U et K_L : des constantes, qui sont calculés selon Kosma et Cunningham ([Shirvani et al, 2014](#))

E = module d'élasticité apparent ($N \cdot mm^{-2}$),

ε = déformation,

μ = coefficient de Poisson ;

F = force (N) ;

R_U, R'_U : rayons de courbure de la surface convexe de l'échantillon au point de contact avec la plaque supérieure en (mm).

R_L, R'_L : rayons de courbure de la surface convexe de l'échantillon au point de contact avec la plaque inférieure (mm) (Pappas et al, 1988 ; Sirisomboon et al, 2012).

Il faut dire aussi que si cette méthode est utilisée pour caractériser les propriétés des pommes de terre ou de tout autre produit, il est nécessaire de définir une vitesse de référence également comme limite de pénétration de la mâchoire mobile (Shirvani et al, 2014).

3.2.1.3 Théorie de BOUSSINESQ

La solution originale pour l'évaluation des relations contrainte-déformation d'une manière similaire à la théorie de Hertz mais ici par pénétrateur cylindrique rigide à tête plate a été proposée par BOUSSINESQ (1885), plus tard cette solution a été développée par TIMOSHENKO et GOODIER (1951), qui ont montré qu'en connaissant :

F : les valeurs de charge utilisées (en N),

ε : la déformation élastique,

μ : le coefficient de Poisson,

D : le diamètre de la matrice (mm),

E : le module d'élasticité (N .mm⁻²),

Peut être calculé avec l'équation (2):

$$E = \frac{F(1-\mu^2)}{D \cdot 2\delta} \quad (2)$$

Cette méthode, a été utilisée par FINNEY et HALL (Khodabakhshian and Emadi, 2011) pour le module d'élasticité des pommes de terre. Cette technique est plus adaptée aux caisses de produits relativement volumineux tels que les pommes de terre, les pommes, et les poires...

Tableau : 4 Méthodes et théorie utilisées pour la détermination du module d'élasticité

Type d'essai	Matériaux utilisés	Référence
Loi de HOOK	Pommes, pommes de terre, blé, maïs	Arnold et Roberts (1969), Finney et coll. (1967), Mohsenin et Cooper (1963), Mohsenin et Cooper (1965), Shelef et Mohsenin (1969), Zoreb et Hall (1960)
HERTZ	Pommes, pêches, poires, maïs, blé	Arnold et Roberts (1966), Arnold et Roberts (1969), Finney et coll. (1967), Mohsenin et Cooper (1963)
BOUSSINESQ	Pommes, pêches, poires, pommes de terre, blé, maïs	Finney et coll. (1967), Morrow et Mohsenin (1966), Shelef et Mohsenin (1969), Bois et coll. (1965)

3.2.1.4 Coefficient de poisson

Les propriétés élastiques apparentes, telles que le coefficient de Poisson, peuvent être utilisées pour comprendre le comportement de la réponse au chargement des matériaux et pour comparer les forces relatives appliquées à ces derniers.

En raison de la difficulté de mesurer le coefficient de Poisson des fruits et légumes, (à cause de la teneur en eau qui varie en fonction du produit ou du temps) ce paramètre, peut être calculée comme suit (Kojima, 1983 ; Sirisomboon and al, 2012)

$$\mu = \frac{0,5Mw + 0,1(100 - Mw)}{100} \quad (3)$$

Avec Mw : Teneur moyenne de l'eau des fruits et légumes.

On note que les coefficients de Poissons varient en fonction de la teneur d'eau et cela explique bien la variation des textures des produits agricoles en général et principalement des pommes

de terre en fonction du temps et donne un grand intérêt aux conditions de récolte, de transport et principalement le stockage et pour garder un produit frais pour la consommation.

3.3 Amortissement mécanique

Les pommes de terre sont manipulées automatiquement ou manuellement sur les lignes de conditionnement plusieurs fois avant l'arrivée aux consommateurs au moment de l'achat (récolte, stockage, marché, industrie). Les endommagements mécaniques se produisent principalement dans le système de traitement après récolte en raison des forces d'impact et de compression.

Les efforts de compression agissant sur le produit manipulé sont généralement des charges statiques lors de la manutention. Afin d'étudier leur comportement mécanique, ces efforts deviennent de plus en plus importants, (jusqu'à 40% du produit est endommagé lors de ces étapes du cycle de vie), le travail vise donc à réduire ces dégâts (Campbell et al, 1986 ; Salunkhe et al, 1989).

Dans des conditions de chargement cyclique, les déformations peuvent être en retard sur la contrainte, ce qui donne lieu à une hystérésis mécanique. Le comportement élastique résultant en fonction du temps est associé à un amortissement mécanique et les vibrations d'un solide viscoélastique peuvent être modélisées théoriquement et numériquement pour étudier également la résistance limite avant endommagement.

4 LA RHEOLOGIE DE LA POMME DE TERRE

Les aliments peuvent être liquides, semi-rigides ou solides ; cependant, les produits alimentaires ne peuvent généralement pas être considérés comme des liquides purs, car ils présentent également certaines propriétés des solides. Ils peuvent être décrits comme semi-doux ou mous. Ces produits présentent le comportement de viscoélasticité, indiquant qu'ils ont des propriétés visqueuses (type liquide) et élastiques (type solide).

Ces produits ne diffèrent pas du tout par un seul paramètre tel que la viscosité. Deux paramètres sont nécessaires : le paramètre viscoélastique, qui décrit la description du comportement visqueux, et le module d'élasticité et de comportement élastique. Ces paramètres sont liés à la quantité d'énergie qui peut être stockée dans les systèmes (réponse élastique rigide) et à la quantité d'énergie dépensée pour stimuler le débit de l'échantillon, et sont définis comme l'énergie perdue ou dispersée (réponse du fluide visqueux).

Les aliments solides sont généralement sollicités à plusieurs formes des charges mécaniques : traction, compression, tangentielle (cisaillement) ou torsionnelle (agissant sur une section

transversale) et durant plusieurs phases de cycle (récolte, stockage) la classification des aliments solides est encore plus complexe que celle des aliments liquides, il existe deux grands groupes: les aliments viscoélastiques, principalement de nature semi-solide et solide, forment un groupe important d'aliments non élastiques.

La rhéologie alimentaire étudie les relations entre la contrainte-déformation, ou la tension constante imposée sur les aliments à l'échelle de temps, afin de comprendre les effets de la transformation sur les produits, de sonder la structure du système, de révéler les aspects critiques de la texture des aliments et de corrélérer leurs caractéristiques de texture avec évaluation sensorielle.

Trois régimes doivent être pris en compte pour comprendre le comportement rhéologique sous contrainte d'une matière alimentaire viscoélastique solide. La première région, dans laquelle la loi de Hooke est respectée, est la région linéaire où la relation entre la contrainte et la déformation est proportionnée. La deuxième région est caractérisée par la non-linéarité et reflète une relation plus complexe entre la contrainte et la déformation.

Le dernier point se produit au niveau de l'échantillon La deuxième partie est très importante pour décrire l'évaluation sensorielle des aliments produits et sa contribution à la compréhension de l'analyse de texture.

4.1 Modélisation rhéologique

La rhéologie décrit la déformation d'un corps sous l'influence de contrainte, la nature de la déformation dépend des conditions matérielles du corps.

Les solides idéaux se déforment élastiquement, ce qui signifie que le solide se déformera puis reviendra à son état précédent une fois que la force cessera, dans ce cas, l'énergie nécessaire à la déformation sera principalement récupérée après la fin de la contrainte, si la même force est appliquée aux fluides idéaux, elle fera couler et l'énergie utilisée se dispersera dans le fluide sous forme de chaleur. En réalité, cependant, les matériaux biologiques présentent un comportement viscoélastique. Un tel comportement viscoélastique peut être représenté physiquement par une combinaison de ressorts et d'amortisseurs. Le nombre spécifique et la combinaison d'éléments individuels requis pour représenter un matériau est déterminé par le comportement d'un échantillon dans diverses conditions d'essai.

Deux tests physiques extrêmement importants et largement utilisés en rhéologie la relaxation de la contrainte et le fluage statique, en l'absence de banc d'essai, on peut bénéficier de la modélisation numérique (EF).

4.1.1 Essais de fluage

C'est une déformation dépendant du temps sous une charge appliquée (force de chargement constante/contrainte constante), qui se produit généralement à des différentes températures (la condition réelle de l'éprouvette), en conséquence, le matériau subit une augmentation en fonction de la longueur (Figure 5), qui pourrait être dangereux, forcément guide le marteau à un vieillissement rapide par conséquent ce dernier perd sa propriété fondamentale.

4.1.2 Essais de relaxation

Le test de relaxation des contraintes consiste à contraindre un matériau à une déformation constante, puis à maintenir cette déformation durant tout l'essai (Figure 5). La contrainte requise pour maintenir le matériau viscoélastique à la déformation constante diminue avec le temps. Ce phénomène s'appelle la contrainte relaxation ; elle est due à un réarrangement du matériau à l'échelle moléculaire.

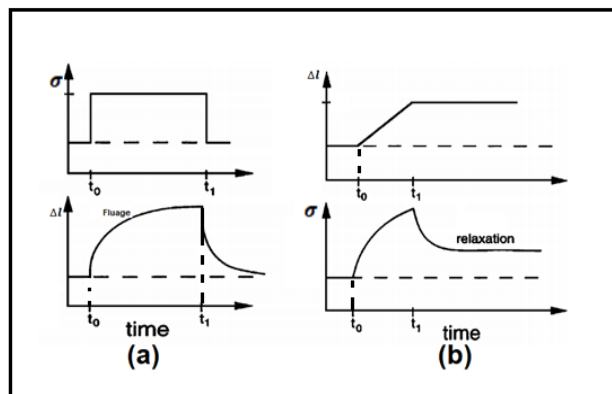


Figure : 5 Diagrammes Des Comportements Viscoélastiques De Charge-Déformation (A) Un Essai De Fluage (Contrainte Appliquée Constante), (B) Un Essai De Relaxation Des Contraintes (Déplacement Est Appliqué A Vitesse Constante)

5 PROPRIETES THERMIQUES :

Lorsque deux objets à différentes températures entrent en contact thermique, ils échangent de l'énergie thermique (chaleur). Un objet plus chaud transfère de l'énergie thermique à un objet plus froid jusqu'à ce que sa température soit égale, moment auquel on dit qu'il est dans un état "d'équilibre thermique".

Les propriétés thermo physiques, forment un ensemble bien connu de propriétés et il existe des relations expérimentales entre elles, ces dernières sont essentielles pour la conception d'équipements industriels, pour la récolte et le traitement sous de nombreuses formes : la manipulation, le traitement, le conditionnement et la distribution. Il existe plusieurs techniques de mesure, des équations expérimentales disponibles et des modèles mathématiques utilisés

pour prédire la densité, la porosité, la chaleur spécifique, la conductivité thermique. Il existe trois modes de transfert de chaleur, qui contribuent au transfert de chaleur global processus dans différentes proportions : conduction, convection et rayonnement.

Ces mécanismes peuvent se produire seuls ou simultanément (cas des pommes de terre dans la zone de récolte). Dans la transformation des aliments, le transfert de chaleur est généralement une combinaison de conduction et de convection. La conduction se produit principalement pendant le transfert de chaleur dans les solides. La convection est la transition des flux de produits (dans les réfrigérateurs). Le transfert de chaleur radiante est moins utilisé, mais il est de plus en plus courant dans le chauffage par micro-ondes et infrarouge (Chips). Comprendre les mécanismes de transfert de chaleur permet de concevoir des équipements et des processus. Seuls quelques aliments comme les fruits frais et certains légumes passent du champ à la table sans aucun traitement thermique.

Le mouvement de la chaleur vers et à travers la matière alimentaire dépend principalement de l'existence d'une différence dans les caractéristiques physiques telles que la taille, la forme, la densité et les propriétés thermiques. Les propriétés thermiques sont uniques pour chaque aliment. Chaque mécanisme de transfert de chaleur a une propriété thermique associée.

Dans des conditions d'équilibre, le taux de transfert de chaleur le long d'un morceau de matériau solide dépendra de la section de surface, du gradient de température et de la conductivité thermique du matériau (k). La conductivité thermique de la plupart des matériaux alimentaires est relativement comprise entre 0,2 et 0,9W/m.K (Mohsenin, 1980; Singh et Heldman, 1993; Fricke And Becker, 2002; Karunasena and Senadeera, 2017). A cause de manque des données, les propriétés thermiques peuvent être calculées à partir des équations utilisant uniquement la teneur en eau.

De nombreuses équations ont été proposées pour estimer les conductivités thermiques de certains produits. Seules quelques équations représentatives sont présentées (Wang and Brennan, 1992).

La méthode directe est une approche en régime permanent qui peut être utilisée pour déterminer la conductivité thermique d'une structure ou la conductivité thermique entre les couches de particules.

Cela concerne le flux de chaleur $\frac{dQ}{dt}$ au gradient de température dans le matériau $\frac{dT}{dx}$, et est connue sous le nom d'équation de conduction thermique unidimensionnelle exprimée en coordonnées cartésiennes. Certains matériaux ont des conductivités thermiques différentes selon les directions : leurs propriétés sont directionnelles ou anisotropes.

6 PROPRIETES PHYSIQUES DES TUBERCULES DE POMME DE TERRE

6.1 Matériels et méthodes

6.1.1 Présentation des paramètres mesurés

Les données physiques des aliments sont nécessaires dans les processus de séparation, Il existe certaines situations dans lesquelles il est souhaitable de déterminer les relations entre les caractéristiques physiques ; par exemple, les fruits sont souvent classés par taille, mais il peut être plus économique de développer une machine pour les classer par poids. Par conséquent, la relation entre le poids et les diamètres majeurs, mineurs et intermédiaires est nécessaire.

Les propriétés physiques et techniques de la pomme de terre devaient être évaluées pour connaître l'effet du conditionnement de la surface volumique sur l'aération pendant le transport et le stockage, ce qui était important pour la conception des équipements de récolte et de traitement.

La forme des tubercules de pomme de terre est très compliquée comme tout produit agricole donc afin de déterminer les propriétés physiques, la masse d'échantillons a été déterminée avec une balance électronique de 0,01 g de sensibilité.

Pour déterminer la taille moyenne de ce produit, trois dimensions linéaires, à savoir la longueur (L, mm), la largeur (W, mm) et l'épaisseur (T, mm) ont été mesurées. Le diamètre moyen géométrique (D_g , équation 4.1) et le diamètre moyen arithmétique (D_a , l'équation 5.1) ont été calculés (Mohsenin, 1986 ; El-Raie, 1996).

$$D_g = \sqrt[3]{L W T} \quad (4)$$

$$D_a = \frac{L+W+T}{3} \quad (5)$$

Toutes ces dimensions ont été mesurées dans un milieu humide en supposant que l'augmentation de la teneur en humidité du tubercule n'a aucun effet significatif sur ses dimensions linéaires(Figure 6).



Figure : 6 Positionnements des trois axes de mesure de la pomme de terre

La sphéricité (\emptyset), qui est définie comme le rapport de la surface de la sphère, qui a le même volume comme celle du fruit, a été déterminé par l'équation 6 (Mohsenin, 1986):

$$\emptyset = \frac{D_g}{L} \quad (6)$$

La surface spécifique (S) de la pomme de terre a été calculée par l'équation 7 (Unal et al, 2017):

$$S = \pi(D_g)^2 \quad (7)$$

La masse volumique apparente et la masse volumique réelle sont utiles pour décider de la maturité, de la texture et de douceur du fruit. (Khoshnam et al, 2007).

La masse volumique apparente a été déterminée en utilisant la relation masse / volume y compris les pores et l'eau (volume apparent) (Fraser et al, 1978 ; Jahromi et al, 2008 ; Ghabel et al, 2010). Les termes densité apparente et volume apparent sont utilisés pour les matériaux granulaires (l'équation 8).

$$\rho_{ap} = \frac{m_s + m_w}{v_s + v_w + v_p} \quad (8)$$

La masse volumique réelle est prescrite en divisant le poids des échantillons par le volume obtenu à partir de la méthode de déplacement d'eau, sans tenir compte des pores du matériau (volume réel). Dans le cas des matériaux granulaires, les termes masse volumiques et volume de particules sont utilisés (définie comme le quotient de masse sur le volume d'un échantillon, sans considérer les pores du matériau [l'équation 9]volume réel) (Stroshine and Hamann, 1994).

$$\rho_{re} = \frac{m_s + m_w}{v_s + v_w} \quad (9)$$

La masse de chaque pièce a été déterminée à l'aide d'une balance électronique d'une sensibilité de 0,01 g (Figure 7.). La taille des fruits a été mesurée par la méthode de déplacement de l'eau. Les fruits ont été abaissés dans un bécher gradué contenant de l'eau et la masse d'eau déplacée par les fruits a été enregistrée. Enfin, les densités de fruits ont été calculées en utilisant l'équation suivante (10) :

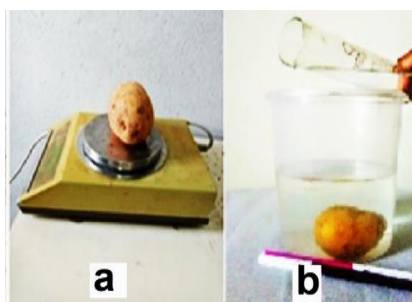


Figure : 7 Détermination De La Masse Volumique

$$\rho_a = \frac{V_t}{M_{rec}} \quad \text{et} \quad \rho_r = \frac{V}{M} \quad (10)$$

La porosité (P) d'un échantillon en vrac a été calculée à partir des valeurs de masse volumique réelle et de masse volumique apparente en utilisant la relation donnée par Mohsenin (Mohsenin, 1986) comme suit : (Ahangarnezhad et al, 2019)

$$P = \left(1 - \frac{\rho_r}{\rho_A}\right) \times 100 \quad (11)$$

La masse volumique apparente présente un important effet dans le domaine agricole, en cas de séparation des produits et le trie selon la masse et la qualité, les pommes de terre ont été étudiées avec des formes estimées standard, Figure 8, telles qu'un volume d'un ellipsoïde (V_e) (Daifla), un volume d'un sphéroïde aplati (V_{sp}) (cas de Spunta) (Tabatabaeefar, 2002 ; fonmboh et al, 2019), ces paramètres seront calculés selon l'équation 12.

$$V_e = \frac{\pi}{6} \times LW^2 \quad \text{et} \quad V_{sp} = \frac{\pi}{6} LWT \quad (12)$$



Figure : 8 La Morphologie Des Deux Variétés Etudiées (Spunta, Daifla)

6.1.2 RESULTATS ET DISCUSSIONS

En résumé, les propriétés physiques des tubercules de pomme de terre (Spunta, Daifla) calculées numériquement tels que la longueur, la largeur, l'épaisseur moyenne, la moyenne géométrique de diamètre et le diamètre moyen arithmétique, sphéricité, rapport hauteur / largeur, masse, volume, .etc., à partir des mesures effectuées sur cent échantillons de chaque type à une température ambiante de 25 ° C, les résultats sont présentés dans le tableau 5.

Tableau : 5 Caractéristiques physiques du tubercule de pomme de terre (100 échantillons de chaque type)

	Variétés	L'Ecart minimum	L'écart maximum
	Spunta :S Daifla :D		
M en g	S	54,23	801,21
	D	79,86	712,3
L (mm)	S	59,39	252,89
	D	54,9	178,2
W (mm)	S	42,89	89,12
	D	52,3	87,32
T (mm)	S	39,21	60,12
	D	49,9	72,32
Dg (mm)	S	33292,3889	451652,638
	D	47758,791	375109,955
Da (mm)	S	47,16333333	134,043333
	D	52,36666667	1013,52
P (%)	S	22,99110082	29,2878974
	D	34,50441477	33,5587461
S (mm ²)	S	104538,1011	1418189,28
	D	149962,6037	1177845,26
∅	S	560,5723	1785,9648
	D	869,9233333	2104,99413
V (mm ³)	S	50078,3	695600,5
	D	72366,98	691223,5
Vsp (mm ³)	S	52269,05057	709094,642
Ve (mm ³)	D	78587,61699	711071,957
masse volumique calculée (Kg.m ⁻³)	S	1037,516454	1129,90559
	D	1016,19063	1001,72703
masse volumique réelle (Kg.m ⁻³)	=	D = 665,56	Sp= 798,98
masse volumique apparente (Kg.m ⁻³)		D=1018,25	Sp =997,89

La pomme de terre avec le nom scientifique *Solanum* subit des divers processus et facteurs variables. Ces opérations peuvent être de simples opérations telles que le nettoyage, la séparation et le lavage, le processus de convoyage, de pesage et / ou de transport, ces opérations permettront ainsi la détermination des différentes propriétés mécaniques afin de trouver des moyens pour les protéger.

Comme le montre le Tableau 5, les valeurs moyennes de masse volumique réelle entre (pour Daifla 665.56 kg.m⁻³, Spunta de 798.98 kg .m⁻³), de masse volumique apparente étaient respectivement de (Daifla 101818k.gm⁻³, Spunta 997.89k.gm⁻³), et masse volumique calculée respectivement (Daifla entre 1016.19 k.gm⁻³et 1001.72 kg.m⁻³, Spunta de 1037.52 kg.m⁻³ jusqu'à 1129.90 kg.m⁻³).

Cette différence entre les propriétés physiques est due à la forme géométrique et la quantité d'eau contenue dans chaque échantillon, ceci donne une idée sur la porosité en cas de Spunta qui est inférieure à celle de Daifla ([kheiralipour et al, 2008](#)).

7 Conclusion

La pomme de terre est un aliment très riche et présente un plat complet (Fer, Potassium, Magnésium, Manganèse...). Elle se caractérise par plusieurs périodes de plantation dans la même année et peut être stockée quelques jours sous terre, pendant la période de récolte.

Dans ce chapitre, un certain nombre de propriétés physiques et leurs relations avec la composition morphologique ont été déterminées. La masse volumique apparente varie entre (665,56 kg.m⁻³ pour Daifla et 798,98 kg.m⁻³ pour Spounta), la masse volumique réelle donnée par les mesures de la pomme de terre respectivement de (Daifla 101818kg.m⁻³, Spunta 997,89kg.m⁻³) et la masse volumique calculée (pour :Daifla entre 1016,19 kg.m⁻³ et 1001,72 kg.m⁻³, et Spunta de 1037,52 kg.m⁻³ jusqu'à 1129,90 kg.m⁻³).

L'étude concerne aussi la détermination de la porosité (P), la géométrie des deux variétés étudiées, le diamètre moyen géométrique (Dg), et la surface spécifique (S).

La différence entre la masse volumique réelle et apparente peut être une variable majeure dans le transport, le stockage et la transformation industrielle.

Les caractéristiques déterminées peuvent contribuer à réduire la détérioration du produit lors de la récolte, et permet aussi de gérer les zones de stockage quel que soit le produit.

Chapitre 2 : PROPRIÉTÉS THERMIQUES

1 INTRODUCTION

Les produits alimentaires et agricoles, sont soumis à divers types de traitement thermique. Les processus thermiques dans lesquels la chaleur est transférée comprennent le chauffage, le refroidissement, le séchage et la congélation. La chaleur spécifique et la diffusion thermique sont essentielles pour une bonne conception des équipements pour le traitement de ces produits à différentes étapes, les objectifs de ce chapitre sont d'étudier et de caractériser le comportement des pommes de terre et de valider ces résultats par la méthode des éléments finis.

Les propriétés thermiques des matériaux sont des grandeurs physiques qui caractérisent les matériaux lorsqu'ils sont soumis à une variation de température. La connaissance de ces propriétés permet de modéliser les transferts thermiques dans des systèmes complexes et de prédire leurs comportements thermiques.

2 LES PROPRIETES THERMIQUES

Les propriétés thermiques des aliments et des boissons doivent être connues pour effectuer les différents calculs de transfert de chaleur impliqués dans la conception des équipements et des processus d'estimation du temps pour le stockage la réfrigération, la congélation, le chauffage ou le séchage des aliments (Tansakul and Lumyong, 2008 ; Budžaki and Šeruga, 2014).

Parce que les propriétés thermiques des aliments dépendent fortement de la composition chimique et de la température, et parce que de nombreux types d'aliments sont disponibles, il est presque impossible de donner un modèle expérimental et de classer ses propriétés : les données se composent des fractions massiques des principaux composants trouvés dans la nourriture. Les propriétés thermiques des aliments peuvent être prédites en utilisant ces données en conjonction avec des modèles mathématiques et des propriétés thermiques des différents constituants alimentaires.

Les propriétés thermo-physiques souvent requises pour le calcul du transfert de chaleur comprennent la densité, la chaleur spécifique, l'enthalpie, la conductivité thermique, et diffusivité thermique. De plus, si l'aliment est un organisme vivant, comme un fruit ou un légume frais, il génère de la chaleur par la respiration et perd de l'humidité par transpiration. Ces deux processus doivent être inclus dans les calculs de transfert de chaleur (Califano and Calvelo, 1991 ; Wang And Brennan, 1992).

2.1 Estimation de la conductivité thermique des produits alimentaires

Un bilan énergétique pour un processus de chauffage ou de refroidissement ne peut pas être obtenu à l'intérieur du matériau sans connaître les propriétés thermiques. Dans ce chapitre, les principes et méthodes de mesure de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique sont discutés. De plus, des modèles prédits pour la conductivité thermique et la chaleur spécifique sont donnés.

La conductivité thermique est définie comme la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Les méthodes de traitement théoriques sont nombreuses et parfois simples, mais si possible il est nécessaire de standardiser les résultats avec les expériences (notre cas; pomme de terre), car le temps, les matériaux nécessaires et les bancs d'expériences à la mesure rendent les essais parfois difficiles à réaliser. La diffusion thermique peut être calculée indirectement à partir de la conductivité thermique, densité et chaleur spécifique, il peut également être déterminé directement à partir de la solution de l'équation de transfert de chaleur instable unidimensionnelle.

Les constituants couramment trouvés dans les aliments comprennent l'eau, les protéines, graisses, glucides, fibres et cendres. CHOI et OKOS (1986) ont développé des modèles mathématiques pour prédire les propriétés thermiques de ces composants en fonction de la température. La conductivité thermique des matériaux varie selon la composition et dans certains cas l'orientation physique des composants alimentaires, étant d'origine biologique, a une composition et une structure très variables (Tansakul and Lumyong, 2008). L'effet des changements dans la composition du matériau sur les valeurs de conductivité thermique a été rapporté par CHOI et OKOS (1987). Leurs procédures peuvent être utilisées pour estimer la conductivité thermique du composant k_i et la quantité volumétrique de chaque composant X_{vi} . Une hypothèse importante utilisée dans cette procédure d'estimation est que la contribution de chaque composant à la conductivité thermique du composé est proportionnelle à la fraction volumique du composant telle que suivre (Toledo et al, 2007 ; Rahman et al, 2012)

$$k = \sum (k_i X_{vi}) \quad (13)$$

La conductivité thermique des principaux constituants de pomme de terre ($W \cdot m^{-1} K^{-1}$) de l'eau pur (k_w), protéines (k_p), lipides (k_f), glucides (k_c), fibre (k_{fi}) sont calculés à la température T en °C, en utilisant les équations. (14, 15,16, 17, 18), respectivement :

$$k_w = 0.57109 + 0.0017625 T - T^2 \times 6.7306 \times 10^{-6} \quad (14)$$

$$k_p = 0.1788 + 0.0011958 T - T^2 \times 2.7178 \times 10^{-6} \quad (15)$$

$$kf = 0.1807 - 0.0027604 T - T^2 \times 1.7749 \times 10^{-7} \quad (16)$$

$$kc = 0.2.014 + 0.0013874 T - T^2 \times 4.3312 \times 10^{-6} \quad (17)$$

$$kfi = 0.18331 + 0.0012479 T - T^2 \times 3.1683 \times 10^{-6} \quad (18)$$

La fraction volumique X_{vi} de chaque composant est déterminée à partir de la fraction massique X_i , la masse volumique élémentaire ρ_i , et la masse volumique totale ρ :

$$X_{vi} = X_i \frac{\rho}{\rho_i} \quad (19)$$

La masse volumique de chaque constituant, en kg.m^{-3} , est obtenue en utilisant les équations. (20. 21. 22 .23 .24), respectivement, pour l'eau (ρ_w), protéines (ρ_p), lipides (ρ_f), glucides (ρ_c), fibres (ρ_{fi}) :

$$\rho_w = 997.18 + T \times 0.0031439 - T^2 \times 0.0037574 \quad (20)$$

$$\rho_p = 1323.9 - T \times 0.51814 \quad (21)$$

$$\rho_f = 925.59 - T \times 0.41757 \quad (22)$$

$$\rho_c = 1599.1 - T \times 0.31046 \quad (23)$$

$$\rho_{fi} = 1311.5 - T \times 0.36589 \quad (24)$$

Aussi, dans la littérature, il y a d'autres modèles qui tiennent compte des suppositions internes des produits alimentaires, les plus connus sont les suivants ([Kucukdogan et al, 2018](#)).

-Modèle d'Eucken est basé sur l'équation de MAXWELL (EUCKEN 1940).

- Modèle de KOPELMAN (1966)

-Modèle de LEVY (1981) (version modifiée de MAXWELL- EUCKEN)

-Modèle de conduction convection conventionnel (FOURRIER-NEWTON)

2.2 Loi de FOURIER sur la conduction de chaleur

Nous avons besoin d'une force motrice pour surmonter une résistance afin de transférer une propriété. Pour tout type de processus de transport moléculaire (quantité de mouvement, chaleur ou énergie thermique et masse) l'équation générale peut s'écrire comme suit :

$$\text{Taux d'un processus de transfert} = \text{Force motrice} / \text{La résistance}$$

Considérons un corps d'épaisseur X et de surface A . Imaginons que le mur soit initialement uniforme à une température T_0 . Au temps $t = 0$, un côté est brusquement porté à une température légèrement plus élevée T_1 et maintenu à cette température. La chaleur est se propage à travers le mur en raison de différence de température, au cours du temps, le profil de température

change. Enfin, l'état stationnaire linéaire de la distribution de la température est obtenu. La force motrice du transfert de chaleur est la différence de température ($T_1 - T_0$) (Figure 9).

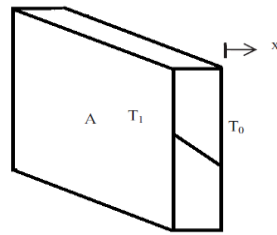


Figure : 9 Transfert De Chaleur En Régime Permanent A Travers Le Corps

Alors que le taux de conduction thermique à travers la paroi est proportionnel à la zone de transfert de chaleur (A), l'épaisseur de paroi (X) offre une résistance au transfert de chaleur. De plus, la capacité du matériau conducteur de la chaleur doit être prise en compte. Chaque matériau a une capacité différente à conduire la chaleur, par exemple : les réactions à la chaleur de pomme de terre et de la pomme ne sont pas les mêmes lorsqu'ils sont exposés à la même quantité de chaleur. Cette propriété du matériau est appelée conductivité thermique (k), tenant compte de tous ces paramètres, la résistance au transfert de chaleur peut s'écrire comme suit:

$$\text{Résistance} = X/kA \quad (25)$$

Lorsque l'état d'équilibre est atteint, le débit de chaleur (Q) à travers le corps peut être écrit en remplaçant les équations (27) et (16.2) dans l'équation (30).

$$Q = kA(T_1 - T_0)X \quad (26)$$

L'équation (3) sous forme différentielle donne la loi de Fourier de conduction thermique :

$$Qx = -kA \frac{dT}{dx} \quad (27)$$

La Figure 10 montre un volume élémentaire de contrôle pour analyser le transfert de chaleur dans un cube avec les côtés dx , dy et dz . Les équations suivantes du bilan thermique à travers le volume de contrôle dans les directions x , y et z , et les équations (loi de fourrier) sont utilisées puisque dans chaque cas une seule direction est envisagée (Brahim et al, 2014) :

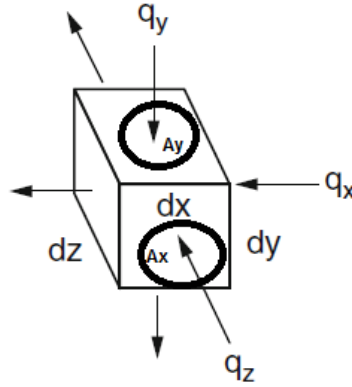


Figure : 10 Un cube pour l'analyse du transfert de Chaleur

Considérons un petit élément rectangulaire de longueur dx, largeur dy et hauteur dz, de volume V_e , comme illustré à la Figure 10. Supposons que la chaleur spécifique est C_p . Un bilan énergétique sur cet élément pour un petit intervalle de temps t peut être exprimé par la première loi de la thermodynamique.

Le taux net de chaleur ajoutée au volume de contrôle inclura tous les effets de conduction. Les effets de production seront inclus dans le terme unique, \dot{q} , qui est le taux volumétrique de production d'énergie thermique. Ainsi, le premier terme peut être exprimé comme (Welty et al, 2014).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = k \left(\left[\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+dx} - \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_x \right] A_x + \left[\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y+dy} - \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_y \right] A_y + \left[\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z+dz} - \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_z \right] A_z \right) + \dot{q} \cdot V_e \quad (28)$$

Notant que les zones de transfert de chaleur de l'élément pour la conduction thermique dans les directions x, y et z sont $A_x=dy \cdot dz$, $A_y=dx \cdot dz$ et $A_z=dx \cdot dy$, respectivement.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} \quad (29)$$

La différence des premiers dérivés divisée par dx, dy ou dz est une dérivée seconde, donc :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (30)$$

L'équation (30) représente la deuxième loi de Fourier de transfert de chaleur. Le taux de changement de température en fonction du temps à n'importe quelle position, dans un cube est proportionnel à la dérivée seconde de la température en fonction de la distance.

3 Détermination expérimentale de la conductivité thermique de pomme de terre

3.1 Matériels et méthodes

3.1.1 Méthode théorique

Considérons un système fermé solide homogène et indéformable, occupant un volume (v) limité par une surface S . Ce système évolue dans le temps sous l'effet d'échanges d'énergie sous forme de chaleur avec l'extérieur et/ou production interne d'énergie thermique. La distribution de température à l'intérieur du volume n'est pas uniforme et change avec le temps. Le système n'est donc pas en équilibre thermodynamique et est donc le siège du flux thermique.

Pour établir l'équation qui régit l'évolution de la température en chaque point du volume \mathcal{V} , nous allons faire un bilan énergétique sur le système. Dans la suite de ce chapitre, nous considérerons que le système est au repos et qu'il n'y a pas de travail mécanique impliqué car le système est indéformable (pas de variation de volume).

Sur la base du théorème d'OSTROGRADSKI pour l'intégrale de surface, nous trouvons

$$\iiint_{\mathcal{V}} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dv = \iiint_{\mathcal{V}} (k \nabla T) dv + \iiint_{\mathcal{V}} P dv \quad (31)$$

Cet équilibre constitue l'équation thermique sous forme globale (intégrée sur tout le volume). Il est valable quel que soit l'élément de volume dv . On peut alors écrire une équation locale de la chaleur, qui permet, après résolution, de déterminer la température en tout point du système à tout moment.

3.1.1.1 Conduction en régime permanent sans dissipation thermique interne

On considère un solide (ou un fluide au repos) homogène et indéformable et on suppose que la conductivité thermique du matériau est constante. Reprenons l'équation de la chaleur établie précédemment par :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + P \quad (32)$$

Les hypothèses adoptées en état d'équilibre (permanent) $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ et le terme d'accumulation est nul sans dissipation thermique.

En régime stationnaire, le bilan des flux entrant et sortant du milieu est nul, ce qui se traduit par une conservation du flux thermique traduite par l'équation suivante :

$$\emptyset = \emptyset_E - \emptyset_S = \iint_S -\varphi \cdot ndS \quad (33)$$

3.1.2 Conditions aux limites et hypothèses

On considère une éprouvette cylindrique de longueur L et de section S , composée d'un matériau de conductivité thermique λ . Nous avons imposé un flux de chaleur à l'une de ses extrémités.

On suppose que la pomme de terre est parfaitement isolée sur sa face latérale (donc pas d'échange thermique avec l'extérieur à travers cette surface) et l'état d'équilibre est atteint. On pourra donc supposer que le flux thermique ne se propage que dans la direction axiale \vec{e}_x , la température a été modifiée en fonction de la direction axiale $T = f(x)$ (Lienhard, 2019).

L'équation de la chaleur s'écrit :

$$\nabla^2 T = \frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (34)$$

Dans ce cas on impose un écoulement du côté T_{in} , c'est-à-dire que la face de l'éprouvette est en contact avec l'air qui circule librement est isolée des autres côtés : les débits sont nuls. Etude de la distribution de température à l'intérieur de l'éprouvette :

$T_{in} = T(x = 0)$ et $T_{out} = T(x = e)$ ce qui donne :

$$T(x) = \frac{T_{out} - T_{in}}{e} x + T_{in} \quad (35)$$

La densité du flux thermique qui traverse la pomme de terre à une certaine position x en appliquant la loi de Fourier. (Yunus 2002)

$$\Phi = -k \nabla T = -k \frac{dT}{dx} \vec{e}_x = k \frac{T_{in} - T_{out}}{e} \vec{e}_x \quad (36)$$

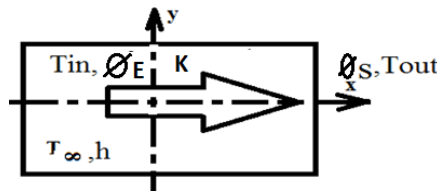


Figure : 11 Distribution de la température

Afin de déterminer les paramètres thermiques inconnus pour les pommes de terre, notre approche est basée sur l'étude expérimentale, nous imposons un flux d'air non forcé :

$$\Phi f = hS(T_{in} - T_{\infty}) \quad (37)$$

Nous concluons alors que le coefficient de convection h est difficile à déterminer. Cela dépend de plusieurs paramètres : $h = f(v, D, x, r, h, l, Cp)$ la valeur du coefficient h peut être déterminée à l'aide des formules semi-empiriques suivantes (Holman, 2010) :

$$h = 1.32 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{1/3} \quad (38)$$

En fait la conductivité thermique varie avec la relation suivante

$$k = k_0 (1 + \beta t) \quad (39)$$

Avec k_0 est la conductivité thermique à température nulle
 Cette étude sera validée par les résultats expérimentaux.

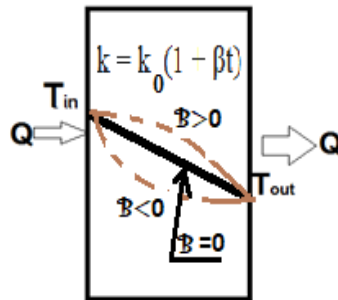


Figure : 12 L'évolution De La Température En Fonction Du Coefficient β

La Figure 12 résume l'évolution de la température en fonction du coefficient β , elle montre que la forme de la courbe de propagation de la chaleur dans le corps est non linéaire.

3.1.3 Méthode expérimentale

3.1.3.1 Protocole expérimental

Un four de laboratoire est fixé à 100 ° C contrôlable. Une plaque isolante en bois a été placée devant le four au lieu de sa porte.

Tableau : 6 Dimensionnement de l'étuve

Longueur (mm)	Largeur de base (mm)	Hauteur (mm)
34	40	76

Notre échantillon a été placé dans une cavité de 0,06 m de diamètre (Figure 14). Pour mesurer la température de PDT, en l'occurrence deux variétés Spunta (présente 80% du marché tunisien) ([Observatoire National de l'Agriculture Tunisienne –ONAGRI, 2014](#) ; [Blom-Zandstra et al, 2018](#)) et Daifla ont été placées en face du trou gravé et fixé dans un support isolant pour éviter le phénomène de l'écoulement de chaleur à l'extérieur (milieu adiabatique) (Figure 13).

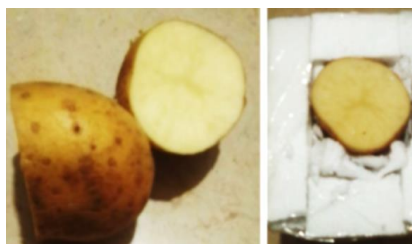


Figure : 13 Fixation de l'éprouvette

Quatre sondes thermométriques ont été placées dans quatre niveaux de la pomme de terre dans le sens longitudinal à des distances x ($x: i = 0, 10 \text{ mm}, 15 \text{ mm}$ et 20 mm). Le même protocole a été choisi pour mesurer la température de la pomme de terre dans le sens transversal à des distances y ($y: d = 0, 10 \text{ mm}, 15 \text{ mm}$ et 20 mm).

La configuration expérimentale a été présentée à la Figure 14.

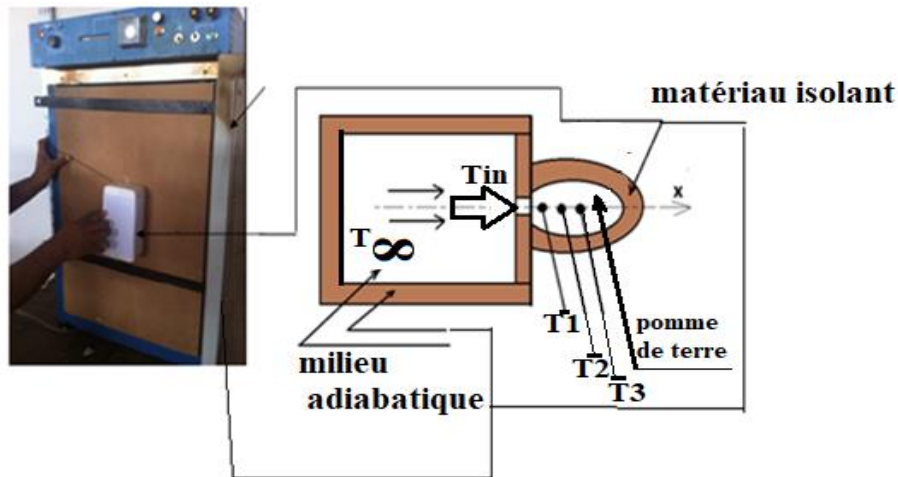


Figure : 14 Configuration expérimentale

Le principe de mesure de la conductivité thermique des matériaux à tester repose sur la réalisation permanente d'un flux thermique unidirectionnel à travers le caisson, créant un gradient de température entre la capacité isotherme (source froide), et l'émetteur de chaleur à débit constant (source chaude).

La convection est naturelle. La mesure est effectuée lorsque l'état stationnaire est atteint en chaque point souhaité e_i ($i = 1, 2, 3$) distant successivement de T_{in} (10mm, 15mm, 20mm), avec une répétition de trois mesures à chaque point souhaité tel que les valeurs des températures mesurées restent après une demi-heure de permanence. Nous avons trouvé que l'évolution de la température entre les points pris en compte est affine ($(T_{(out, i)})$ avec $0 \leq i \leq 3$ dans notre cas).

Le dispositif expérimental mis en œuvre pour la validation des mesures de la diffusivité thermique (présenté par la Figure 14) est composé d'un étuve qui a été étalonné dont les dimensions internes sont présentées dans le tableau 6.

3.1.3.2 Les conditions d'essai réalisées sont :

- fixation de l'éprouvette (dans notre cas pomme de terre) sur un couvercle permettant d'isoler le milieu supposé adiabatique de toutes les directions pour éviter les échanges avec le milieu extérieur,
- mise en place des capteurs pour mesurer les températures de l'étuve et du tube à essai (supposées isolées).

3.1.3.3 Résultats et discussions

L'effet cinétique de chaleur dans une pomme de terre (Spunta et Daifla). Les courbes de variation de température en fonction du temps des deux variétés de pomme de terre (Spunta et Daifla) sont illustrées sur les Figures 15 et 16.

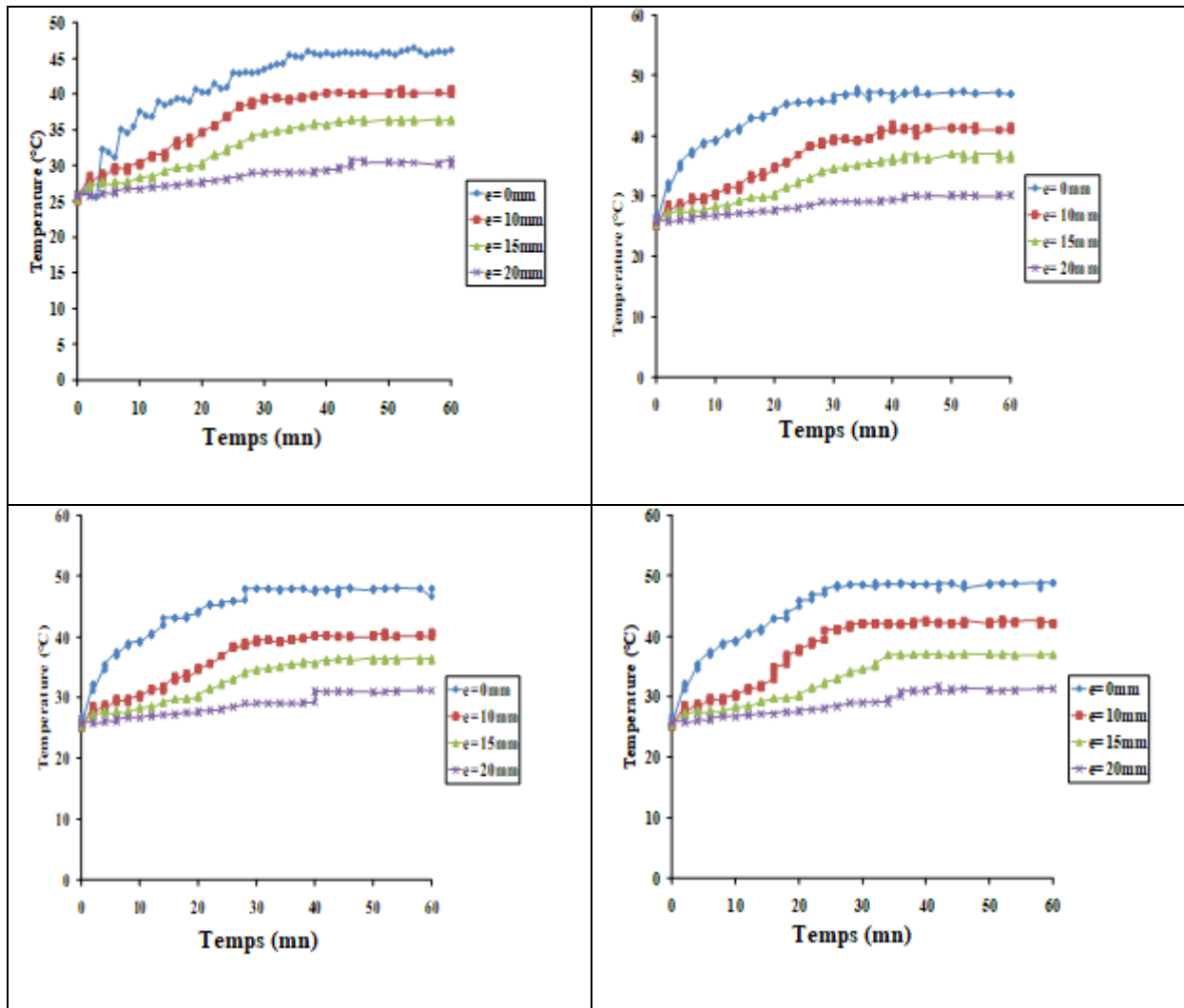


Figure : 15 Variation de la température en fonction du temps le long des directions longitudinale (Spunta)

{(x = 0 ,10 mm, 15 mm et 20 mm) et transversale (y = 0 ,10 mm, 15 mm et 20 mm) de la pomme de terre Spunta ((a) y = 0 mm, (b) y = 10 mm, (c) y = 15 mm et (d) y = 20 m}

Les résultats trouvés montrent la présence de deux phases (Spunta) : transitoire et stationnaire, l'équilibre est atteint après quelques minutes, quelle que soit la direction et la variété de la pomme de terre étudiée. De plus, on a constaté que la température diminue avec l'augmentation de l'épaisseur e_i et e_j .

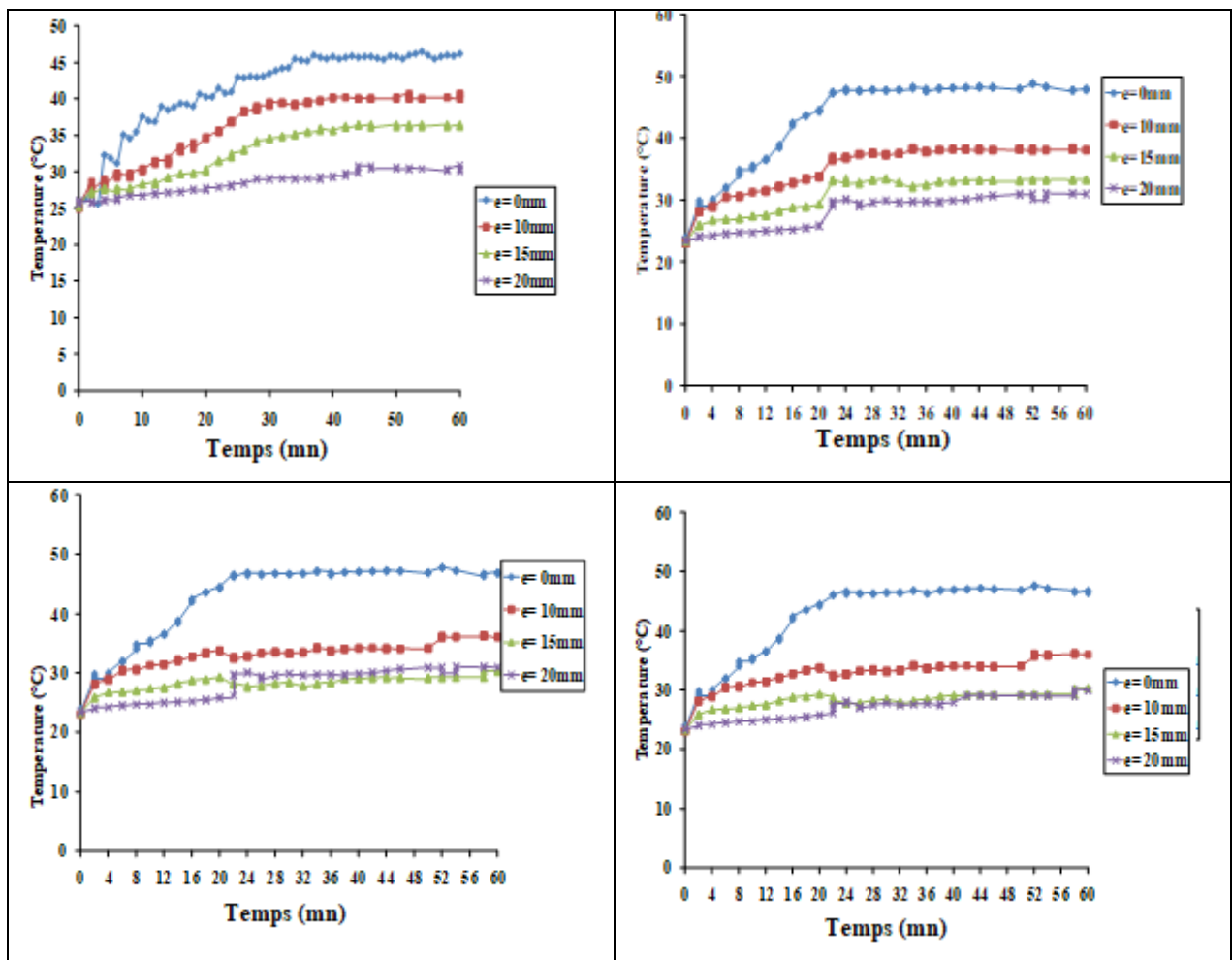


Figure : 16 Variation De La Température En Fonction Du Temps Le Long Des Directions Longitudinales (Daifla)
(x = 0 ,10 mm, 15 mm et 20 mm) et transversales (y = 0 ,10 mm, 15 mm et 20 mm) de la pomme de terre ((a) y = 0 mm, (b) y = 10 mm, (c) y = 15 mm et (d) y

De même pour Daifla, Les résultats montrent l'existence de deux phases transitoire et stationnaire, l'équilibre est atteint après un temps semblable au Spunta, quelle que soit la direction.

L'évolution de la vitesse en fonction des deux directions : longitudinale et transversale de la pomme de terre Spunta et Daifla a été représentée sur la Figure ci-dessous (Figure 17).

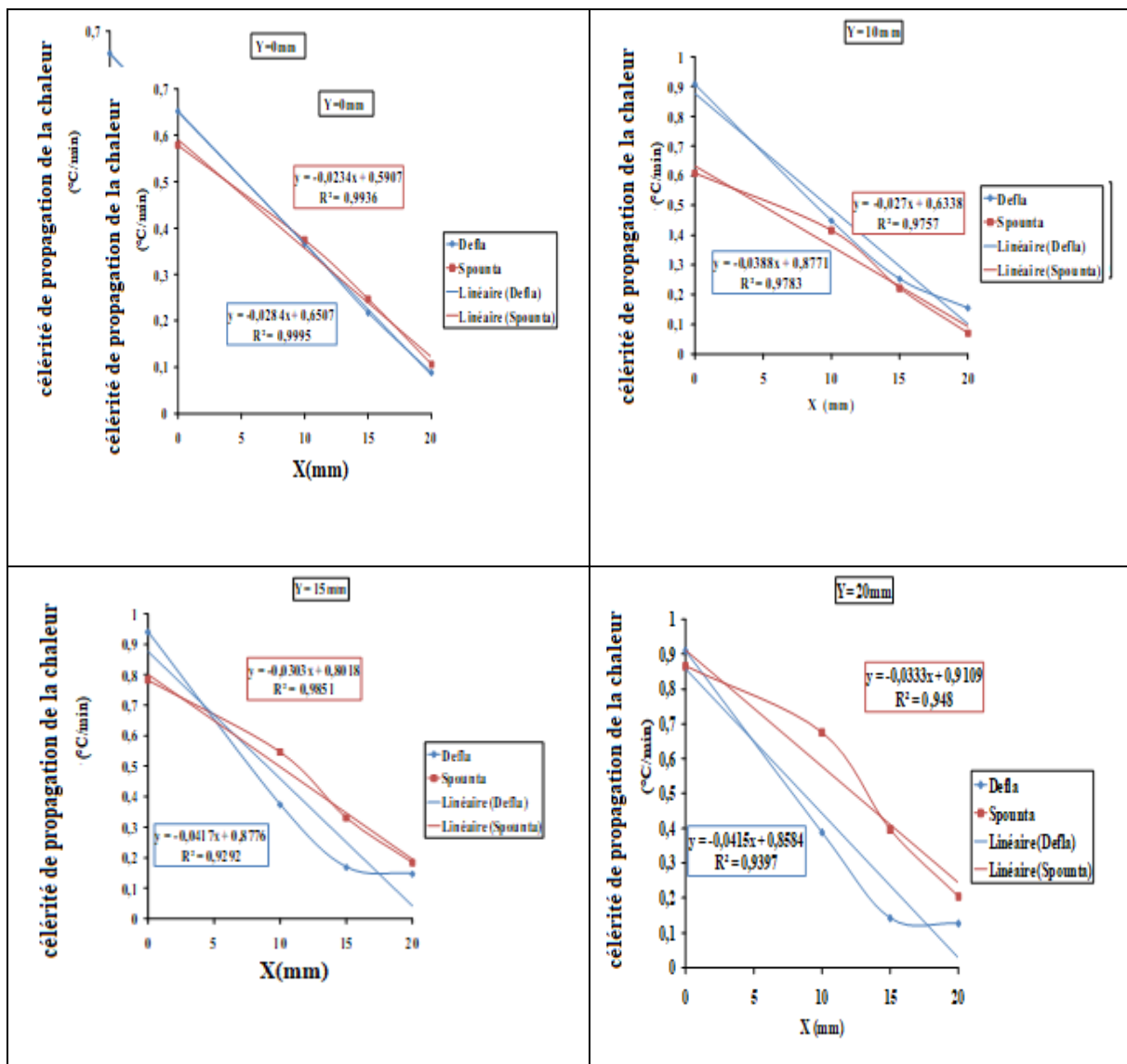


Figure : 17 Evolution du taux de chaleur selon les deux directions : longitudinale et transversale de la pomme de terre Spunta et Daifla

On remarque qu'il y a une corrélation entre les paramètres essentiels de l'essai, aussi bien clair que la vitesse de propagation de la chaleur plus importante pour la variété Daifla (Figure 17a 17b) devient presque à la même (Figure 17c) et inversement en cas de Spunta (Figure 17d), cela peut être expliqué par la forme des modèles étudiés.

Les résultats des tableaux 7 et 8 montrent que les valeurs de k diffèrent selon les directions longitudinale et transversale pour les deux variétés étudiés.

Tableau : 7 Les paramètres de transfert de chaleur (pour le Spunta)

Disposition verticale		Disposition Horizontale		
		X=0,01m	X=0,015m	X=0,02m
k(Wm ⁻¹ K ⁻¹)	h	k	k	k
Y=0m	7,817814	0,464952	0,448102	0,460732
Y=0.01m	7,721376	0,401001	0,40308	0,460567
Y=0.015m	7,77025	0,323678	0,339423	0,488724
Y=0.02m	7,77959	0,327485	0,491227	0,447881

Pour la variété Spunta, les valeurs de la conductivité thermique k, selon différentes dispositions verticales et horizontales, varient de 0,32 jusqu'à 0,5 Wm⁻¹K⁻¹.

Tableau : 8 Les paramètres de transfert de chaleur (pour le Daila)

Disposition verticale		Disposition Horizontal		
		X=0,01m	X=0,015m	X=0,02m
k (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	h	k	k	k
Y=0m	7,817814	0,4835957	0,4904161	0,5299573
Y=0.01m	7,721376	0,4108973	0,4459221	0,570059
Y=0.015m	7,77025	0,3252615	0,3355541	0,5944789
Y=0.02m	7,77959	0,3315573	0,4951435	0,5022015

Dans le cas de la variété Daifla, les valeurs de la conductivité thermique k, selon les mêmes dispositions verticales et horizontales, varient de 0,32 jusqu'à 0,6 Wm⁻¹K⁻¹.

Ces résultats, comme le montre la Figure 18, sont dues à la morphologie de la PDT Spunta-Daifla qui n'est pas uniforme (Rha, 1975; Rastovski et al, 1981).

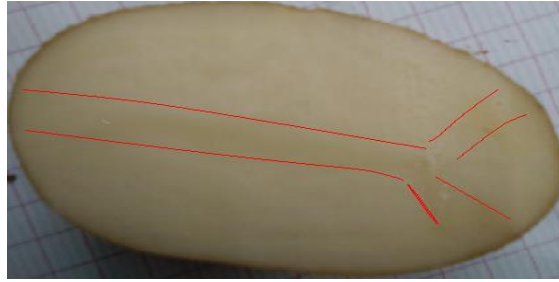


Figure : 18 Morphologie de la pomme de terre

A noter que les valeurs de conductivité k trouvées ci-dessus de la pomme de terre, sont comprises entre $0,32 \leq k \leq 0,6$ et par comparaison avec des aliments de la même texture on trouve par exemple le cas de la pomme $k = 0,51$, (Gane, 1936) et la banane $k = 0,48$ (Kothandaraman et Subaramanyan, 2007 ; Califano and Calvelo, 1991 ; Rahman et al, 2012).

Ces résultats aussi que sur une plage de température étendue de 0 à 100 °C, a un effet direct sur la pomme de terre sous différentes formes (Righetti et al, 2019; Zhang, 2020).

4 Modélisation numérique du transfert de chaleur dans les PDT

4.1 Méthodes des différences finies (FD)

Il s'agit de la méthode la plus ancienne de résolution numérique des équations aux dérivées partielles, qui aurait été introduite par Euler au XVIIIe siècle. C'est également la méthode la plus simple à utiliser dans des géométries simples telles que des sphères ou des cylindres. Les Méthodes des différences finies FD sont couramment appliqués dans la solution de l'équation de conduction thermique et de la loi de Fourier pour le transfert. Lors de l'estimation de l'équation thermique dans le cas du problème 1d ici, nous supposons que la pomme de terre en tant que barre homogène a une conductivité thermique. Le champ de température $T(x,t)$ vérifie l'équation de la chaleur :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (40)$$

Dans les équations la température T en kelvin de l'échantillon d'aliment, C_p la capacité calorifique (à pression constante = constante) k la conductivité thermique. Il reste à ajouter deux conditions aux limites aux extrémités de l'éprouvette [$T(0, t) = T_g$ et $T(L, t) = T_d$ L: longueur] ainsi qu'une condition initiale $T(x, 0) = T_0$, si on suppose dans ce cas que la diffusivité thermique dans la direction (x) , sur un axe temporel qui commence t_{\min} jusqu'à t_{\max} , on discrétise suivant l'axe de temps avec un pas h_t , et h_x suivant l'axe des x :

$$(h_t = \frac{(t_{\max} - t_{\min})}{Nt}, h_t = t_{i+1} - t_i), (h_x = \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{Nx}, h_x = x_{i+1} - x_i),$$

On peut écrire par la suite que :

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{T(i+1,xj)-T(i,xj)}{h_t} = \frac{T_j^{i+1} - T_j^i}{h_t} \quad (41)$$

$$\frac{k\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{T_{j+1}^i + T_{j-1}^i - 2T_j^i}{h_x^2} \quad (28.2) \quad (42)$$

Les solutions de l'équation (40) sont obtenues en divisant le domaine de calcul, c'est-à-dire l'échantillon élémentaire, par une grille structurée rectangulaire. Une grille composée de familles de lignes de quadrillage avec des propriétés comme membres de la même famille ne se croise qu'une seule fois avec les membres de l'autre famille, ce qui donne l'équation suivante :

$$\rho c_p \left(\frac{T_j^{i+1} - T_j^i}{h_t} \right) = k \left(\frac{T_{j+1}^i + T_{j-1}^i - 2T_j^i}{h_x^2} \right) \quad (43)$$

pour simplifier les équations, on pose : $D = (k / \rho c_p)$, (D : coefficient de diffusion) et

$$\Omega = \frac{k}{\rho c_p} \frac{h_t}{h_x^2} = D \frac{h_t}{h_x^2} \quad (44)$$

On obtient l'équation du schéma numérique :(i : indice de variation de temps, j : indice de variation de distance)

$$T_j^{i+1} = \Omega \cdot T_{j-1}^i + (1 - 2\Omega) T_j^i + \Omega \cdot T_{j+1}^i \quad (45)$$

L'écriture matricielle de cette équation à $t=0$ et $T_0 = T_e$

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \dots \\ T_{n-2} \\ T_{n-1} \end{bmatrix}^{n+1} = \begin{bmatrix} 1-2\Omega & \Omega & 0 & - & - & - & - & 0 \\ \Omega & 1-2\Omega & \Omega & - & - & - & - & 0 \\ 0 & \Omega & 1-2\Omega & \Omega & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Omega & 1-2\Omega & \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Omega & 1-2\Omega & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Omega & 1-2\Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \dots \\ T_{n-2} \\ T_{n-1} \end{bmatrix}^n + \begin{bmatrix} T_g \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ T_d \end{bmatrix}$$

L'expression des séries de Taylor où la concordance polynomiale a été utilisée pour obtenir des estimations approximatives des dérivées première et seconde ordre (Ferziger,ataL, 2002 ; Salagnac et al, 2004). Ces équations unidimensionnelles montrent que la chaleur dépend du temps et de la direction, elles peuvent être résolues par des diagrammes FD explicites ou implicites en une étape (Salagnac et al, 2004 ; Ansari, 1999).

Dans le tableau 9 suivant, nous regroupons les paramètres nécessaires pour résoudre ce problème où nous avons imposé des intervalles de temps et de distance au nombre de cent pour faciliter le calcul ou la simulation sur Matlab.

Tableau : 9 Conditions aux limites de problème

conditions aux limites de problème			
Td	298,13 K	Temps	3600 s
Tg	319,13k	Nx	100
L	60mm	Nt	100
Temps		3600 s	

4.1.1 Capacité thermique

La capacité thermique spécifique est la quantité de chaleur requise pour changer une unité de masse d'une substance en un degré de température. La capacité thermique des aliments est importante pour le transfert de chaleur car elle détermine à quelle vitesse un aliment peut être chauffé. Dans les aliments non congelés, la chaleur spécifique est relativement constante par rapport à la température. La capacité thermique spécifique d'un aliment à des températures supérieures à son point de congélation initial est obtenue à partir de la moyenne massique des capacités calorifiques spécifiques du composant alimentaire. La capacité thermique de la purée de PDT a augmenté avec l'augmentation de la température (Fricke and Becker, 2002)

$$C_p = \sum C_i \cdot W_i \quad (28.2) \quad (46)$$

Où c_i est la capacité calorifique spécifique des composants alimentaires individuels et w_i est la fraction massique des composants alimentaires. Si les données de composition détaillées ne sont pas disponibles, une équation plus simple pour la capacité calorifique spécifique d'un aliment non congelé, (Chen 1985), on peut utiliser :

$$C_p = 4190 - 2300W_s - 628W_s^3 \quad (47)$$

Où C_p est la capacité thermique spécifique $J / (kg \cdot K)$ et w_s est la fraction massique des solides dans l'aliment.

C_p (pomme de terre à pression constante (Pa))= $(2500.96 J.kg^{-1}.k^{-1} \text{ à } 3500J.kg^{-1}.k^{-1})$ (Toyokazuand, 1970 ;Murakami, 1997).

condition aux limites : à $t=0$, $t=100^\circ\text{C}$, $x=0$ mm, $k(\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1})$ =(indiqué dans les tableaux suivant la position étudiée et aussi la variété (Toyokazuand,1970 ; Iammari et al 2020).

4.2 Méthodes des éléments finis (FE)

4.2.1 Formulation numérique du problème thermique

La résolution par éléments finis est une méthode qui consiste à découper le domaine physique à traiter en plusieurs sous-domaines appelés éléments finis de dimensions non infinitésimales. La recherche de solution des solutions est remplacée dans chaque élément par une approximation avec des polynômes simples (fonctions tests) et le domaine peut alors être reconstitué avec l'assemblage ou la sommation de tous les éléments ; autrement dit le principe de l'utilisation d'une approximation nodale par sous domaines. Sur chaque sous domaine on approche la fonction $U(x)$ par :

$$U(x) = \sum_1^n N_i(x)U_i \quad (48)$$

Les fonctions d'interpolation varient en fonction du type d'élément et du nombre de ses nœuds. En général, les fonctions d'interpolation sont choisies comme une séquence polynomiale. Dans le cas de problèmes unidimensionnels, la fonction d'interpolation est généralement de la forme :

$$U(x) = \sum_1^n w_i x^i \quad (49)$$

Pour les problèmes bidimensionnels elle est généralement de la forme :

$$U(x) = \sum_1^n w_i x^j y^k \quad j+k \leq n \quad (50)$$

Pour les problèmes tri dimensionnels :

$$U(x) = \sum_1^n w_i x^j y^k z^l \quad j+k+l \leq n \quad (51)$$

*(n) représente le degré d'interpolation. Pour les cas simples, la détermination des fonctions d'interpolation peut être faite directement.

La méthode EF est l'une des techniques les plus générales pour la solution numérique des équations différentielles et a été étonnamment efficace. Dans les géométries bidimensionnelles, les EF sont généralement triangles ou quadrilatères alors que dans les tridimensionnels tétraèdres ou hexaèdres sont les plus fréquemment utilisés (Sardi and Yanniotis2007). L'approche de la solution EF peut être classée en trois grands groupes : la méthode de Rayleigh-Ritz, la méthode de Galerkin et la méthode des moindres carrés. La méthode Galerkin est la plus couramment utilisée dans les problèmes d'analyse thermique et donc en génie alimentaire, de sorte que la discussion dans la suite de cette section se limitera à une brève présentation de ses principales caractéristiques.

Dans la méthode Galerkin, l'intégrale des résidus pondérés sur l'élément Le domaine est égal à zéro en appliquant les fonctions d'interpolation appropriées dans La matrice de rigidité.

Par conséquent, l'équation, peut être écrite comme suit, où (n_x, n_y, n_z) est les vecteurs normaux unitaires vers l'extérieur à la frontière Γ_n , d , T et q sont la température prescrite et le flux sur les frontières correspondantes, h est coefficient de la convection de transfert de chaleur, et T_f est la température ambiante.

$$\int_{\Omega} \nabla w \left(k_{(x,y,z)} \frac{\partial T}{\partial (x,y,z)} \right) d\Omega + \int_{\Omega} w \left(\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - Q \right) d\Omega - \int_{\Gamma_n} w \bar{q} d\Gamma - \int_{\Gamma_d} w h (T_f - T) d\Gamma = 0 \quad (52)$$

Où $[N] = [N_i N_j N_k N_m]$ est la matrice de la fonction de forme, et N_i, N_j, N_k et N_m sont les Fonctions d'interpolation pour un élément tétraèdre typique indiqué par quatre coins nœuds i, j, k et m La matrice de la fonction de forme est évaluée en supposant une variation de température prédéfinie à l'intérieur de chaque élément (par exemple linéaire (Wang and Sun, 2002) après manipulations et discrétisation, l'équation (52) se réduit à

$$\left[\frac{[N]}{\Delta t} + \alpha [K] \right] \{T\}_{n+1} = \left[\frac{[N]}{\Delta t} - (1 - \alpha) [K] \right] \{T\}_n \quad (53)$$

Où $\{T\}$ le vecteur de température et $[K]$ la matrice. Une analyse détaillée de la dérivation des termes de l'équation (53) est proposée par Wang et Sun (Wang and Sun, 2002) .Dans (18) également, α est un facteur de pondération qui doit être choisi dans l'intervalle entre 0 et 1, On notera que pour différentes valeurs de α , différents schémas numériques sont obtenus.

4.2.2 Détermination des propriétés thermiques

A partir d'un banc d'essai thermique réalisé par épingleage d'un échantillon (Figure 14), on observe que le champ de température présente une certaine incohérence sur les bords de la pomme de terre, on peut donc se limiter à une modélisation 1D -2D (selon la direction X, XY) pour réaliser une simulation numérique et une définition pour mesurer l'évolution de la température sur les faces.

Le problème de diffusion de la chaleur dans le domaine (pomme de terre) Ω présenté à la Figure 10 est typiquement décrit par la diffusion de chaleur par la loi de Fourier.

4.2.2.1 Conditions aux limites

Les conditions aux limites sont des contraintes (des valeurs) que l'on impose à la fonction solution (ou à certaines de ces dérivées) sur tout ou partie du domaine Ω , et/ou sur toute ou partie

de sa frontière $\Gamma = \partial\Omega$. D'un point de vue « vocabulaire », certains types de conditions à la limite standard existent qui sont listées ci-après.

4.2.2.1.1 Dirichlet – valeurs aux bords

Si on définit les conditions de Dirichlet imposées à une équation différentielle ou une équation aux dérivées partielles, lorsque l'on spécifie les valeurs que la solution doit être vérifiée sur toute ou partie de la frontière du domaine. Il peut s'agir par exemple d'une température imposée (par exemple T^*) en des points d'une structure.

4.2.2.1.2 Neumann – gradients aux bords

On parle de condition de Neumann imposée à une équation différentielle ou une équation aux dérivées partielles, lorsque l'on spécifie les valeurs des dérivées que la solution doit vérifier sur la frontière du domaine (flux, contraintes...) Problèmes physiques : équations différentielles et aux dérivées.

4.2.2.1.3 Robin – relation gradient/valeurs sur le bord

On parle de condition de Robin ou condition de Fourier ou condition d'impédance imposée à une équation différentielle ou une équation aux dérivées partielles, lorsque l'on spécifie une relation linéaire entre les valeurs de la fonction et les valeurs de la dérivée de la fonction qui est solution du problème sur toute ou partie de la frontière du domaine. C'est donc une pondération de conditions de Dirichlet et de Neumann.

4.2.3 Résultats et discussion des simulations unidirectionnelle 1D

Pour résoudre ce problème, nous voulons modéliser les transferts de chaleur pendant la phase de chauffage de l'éprouvette. Nous proposons de commencer par une modélisation unidimensionnelle. La solution de l'équation de la chaleur peut être écrite comme suit :

$$\rho c_p(T)\dot{T} - k \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = -(\text{div} \vec{q}_r) \quad (54)$$

Avec ρ est la masse volumique du matériau, C_p la capacité calorifique massique, k est la conductivité thermique, q_r est la densité de flux.

Nous écrivons les conditions aux limites de la manière suivante :

Dans ce cas, le coefficient de transfert de chaleur par convection, sur la surface en face avec l'étuve est toujours supérieur à celui correspondant à la surface de la pomme de terre. Par conséquent, nous choisissons de prendre en compte et d'identifier les coefficients de la convection (température $T_\infty = 100^\circ\text{C}$ et Température sur chacun des points $=46,5^\circ\text{C}$ sur les faces et le coefficient d'échange thermique $h=7,81\text{w} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$, Température à l'intérieure de

potom de terre $T=23^{\circ}\text{C}$ et la conductivité thermique $k=0.56\text{w.m}^{-1}\text{k}^{-1}$) l'évolution et représenté dans la Figure suivante.

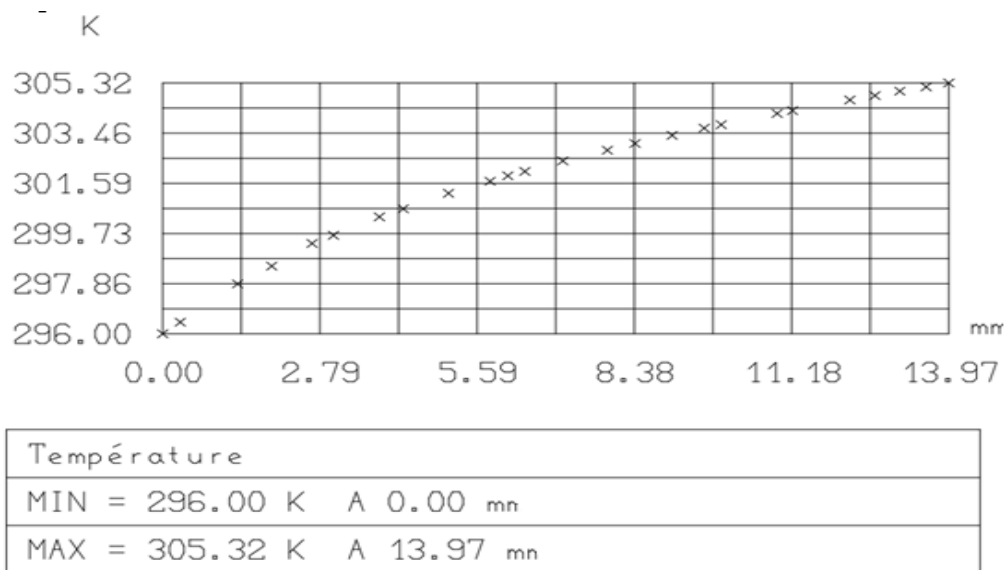


Figure : 19 Modélisation numérique de l'évolution de la température en fonction du temps (Y=0 ; X=50mm) (RDM6)

Les résultats numériques montrent qu'après environ 14 minutes un tubercule de pomme de terre de taille moyenne exposée à une température de 46°C les propriétés thermiques s'homogénéise.

4.2.4 Formulation FEM pour les problèmes bidimensionnels 2D

L'application de la méthode FE pour la résolution des problèmes de conduction thermique est présentée pour le cas bidimensionnel.

Les bases des équations FE pour ce problème bidimensionnel seront résolues à l'aide de la méthode GALERKIN.

L'équation déterminante pour la conduction thermique dans le solide est :

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(kx \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(ky \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q(x, t) \quad (55)$$

Où C désigne la capacité thermique spécifique, ρ est la densité et les conductivités thermiques anisotropes dans les directions x et y sont notées kx et ky (montré expérimentalement), les conditions initiales, nécessaires pour résoudre l'équation (55), sont

$$T(x, y, t)|_{t=0} = T_0(x, y) \text{ dans } \Omega$$

Trois différents types de conditions aux limites sont appliqués :

* Le premier type (Dirichlet), condition aux limites, on suppose que la valeur de la température à la région limite est connue.

$$T(x, t) = \bar{T} \text{ sur } \Gamma_d(a) \quad (56)$$

Pour la condition aux limites de second type (Neumann), la dérivée de la température à la frontière est connue.

$$kx \frac{\partial T}{\partial x} n_x + ky \frac{\partial T}{\partial y} n_y = \bar{q} \quad (57)$$

Avec $N \cdot q(x,y,t) = q \Gamma(x,y,t) = \bar{q}$ sur $\Gamma_n(b)$

Le troisième type de condition aux limites de Robin

$$kx \frac{\partial T}{\partial x} n_x + ky \frac{\partial T}{\partial y} n_y = h(T(x,t) - T_f(t)) \text{ sur } \Gamma_r(c) \quad (58)$$

Les conditions aux limites sont utilisées (Figure 20) pour imposer la température $T \Gamma(x,t)$ sur le bord de Dirichlet (Γ_d), le flux de chaleur normal $q \Gamma(x,t)$ sur le bord de Neumann (Γ_n) et une relation de type convection entre la température et le flux de chaleur normal sur la frontière de Robin (Γ_r), respectivement. On suppose que les frontières de Dirichlet, Neumann et Robin sont complémentaires et disjointes :

$$\Gamma = \Gamma_d \cup \Gamma_n \cup \Gamma_r \text{ et } \phi = \Gamma_d \cap \Gamma_n = \Gamma_d \cap \Gamma_r = \Gamma_n \cap \Gamma_r.$$

Dans les expressions (a) et (b), le vecteur N rassemble les composantes de la normale hors frontière. Dans la loi de convection (b), $T_f(t)$ est la température du fluide au contact de la frontière Γ_r , supposée (par morceaux) constante dans l'espace, mais variable dans le temps, et h est le coefficient de transfert thermique.

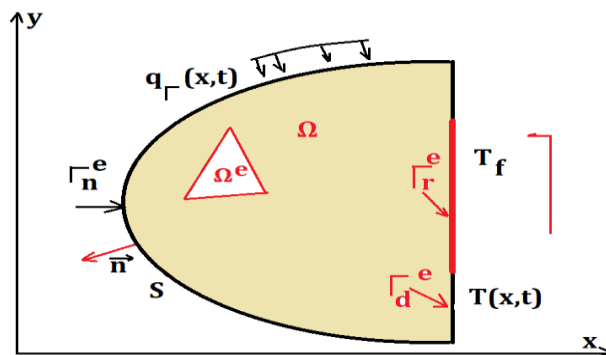


Figure : 20 Types de conditions aux limites.

Γ_D, n : frontière essentielle ou la température est connue ; Γ_R : frontière naturelle ou le flux de chaleur (dérivée de la température) est connu.

4.2.5 Formulation faible

La formulation faible associée au problème de conduction thermique qui est décrit dans le model étudié est obtenue en multipliant l'équation de chaleur par une fonction test w (ou fonction d'interpolation : thermique) suffisamment régulière puis en intégrant sur tout le domaine Ω et en introduisant la nature convective du flux imposé sur la pièce :

$$\int_{\Omega} \nabla w \left(kx \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(ky \frac{\partial T}{\partial y} \right) d\Omega + \int_{\Omega} w \left(\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - Q \right) d\Omega - \int_{\Gamma_n} w \bar{q} d\Gamma - \int_{\Gamma_d} w h (T_f - T) d\Gamma = 0 \quad (59)$$

* Notez que la forme des éléments (triangle dans ce cas) est la source principale des paramètres de la fonction d'interpolation et par la suite elle doit être linéarisée.

4.2.6 Résultats et discussion des simulations bidirectionnelles 2D

Dans cette partie, nous considérons que les pommes de terre sont homogènes et isotropes. Une charge thermique de la partie encastree de la pièce (zone elliptique), est imposée sur la zone plane. Cette dernière a été déterminée expérimentalement, elle est de l'ordre de 46 ° C. Le contrôle est assuré par un thermomètre numérique.

La modélisation numérique est effectuée en utilisant ABAQUS. Le modèle se compose d'environ 26 000 éléments linéaires tétraédriques C3D4. Pour les conditions aux limites, certaines hypothèses ont été vérifiées, (symétrie ...),

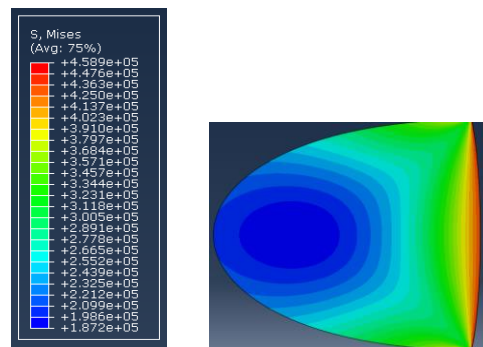


Figure : 21 La variation des contraintes sous l'effet de température

La Figure 21 montre que les zones les plus sollicitées sont situées au voisinage de la source de chaleur, on explique que l'effet thermique engendre un effet mécanique à cause des modifications structurales sous forme d'infraction moléculaire.

Dans le même cadre, on constate qu'il existe des zones qui ne sont pas stressées en raison des propriétés thermiques et mécaniques du modèle : la morphologie de la pomme de terre ne permet pas la transmission des efforts, cela peut causer un endommagement local puis total en fonction du temps.

Cette problématique est un véritable handicap pour les produits alimentaires et ouvre plusieurs axes de recherches surtout dans le domaine de modélisation par élément finis à cause des difficultés dans la récolte des données et la création des modèles.

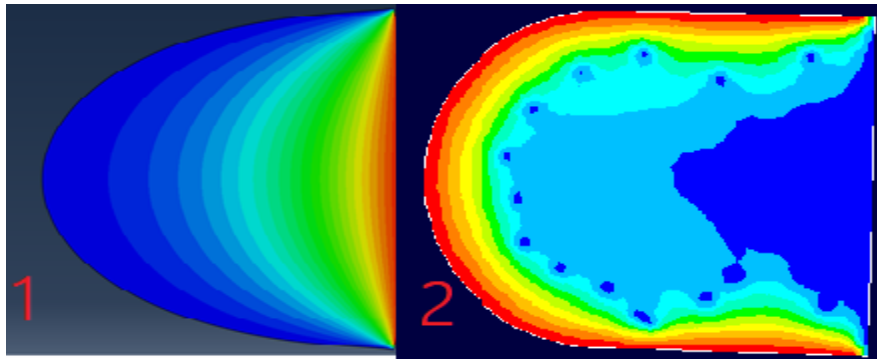


Figure : 22 Distribution de la température dans une pomme de terre en (2D) après 1 heure

Pour garantir que la température circule dans tout le tubercule il faut appliquer un flux sur tous les côtés. En cas de stockage ou de préparation de repas ou chips il faut garantir une répartition uniforme de température en se basant sur une étude expérimentale donnant des valeurs réelles de la célérité de chaleur (Figure 17). Les résultats numériques de la célérité sont visualisé sur la Figure 23.

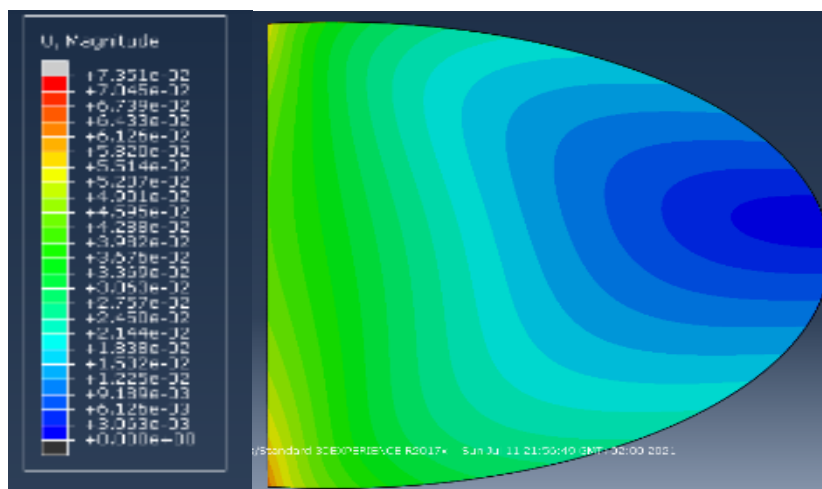


Figure : 23 La célérité de température dans la pomme de terre

La Figure 24 présente une visualisation des directions des flux en chaque maille, et les vecteurs résultants des composants thermiques.

Numériquement, cette variation s'explique par le type de discrétisation et la distance de position du nœud par rapport aux points de chaleur.

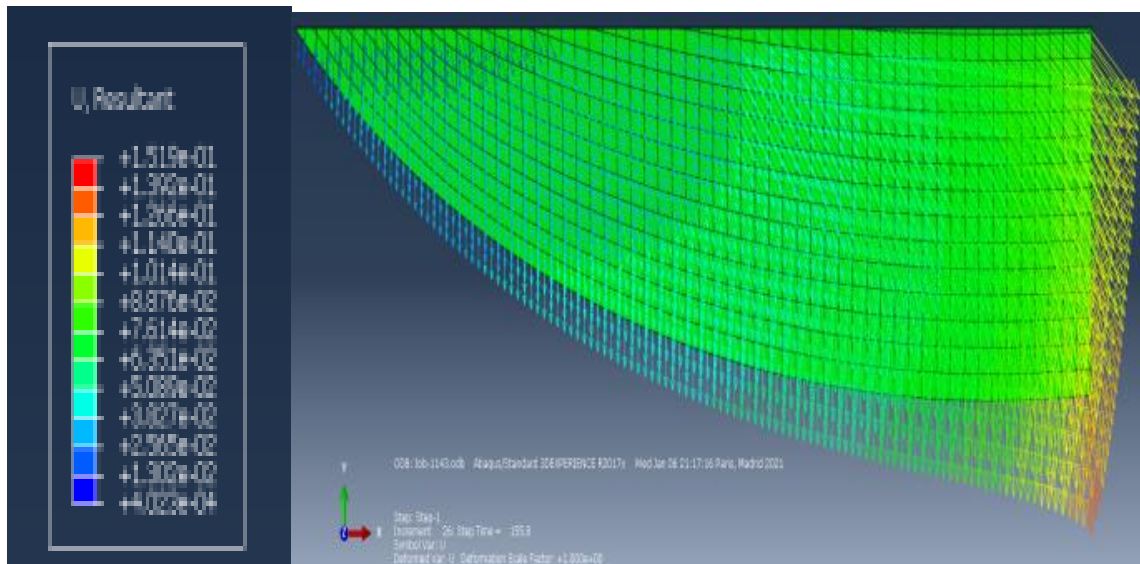


Figure : 24 Les directions des flux thermiques

La Figure 25 montre que la modélisation et la recherche expérimentale sont complémentaires. Elle dévoile clairement l'existence de deux phases : stationnaire et transitoire. L'équilibre thermique est limité entre 32°C et 46°C pour une éprouvette sollicitée par un flux de température à $T_{\infty} = 100^{\circ}\text{C}$ après 13 à 14 minutes environ.

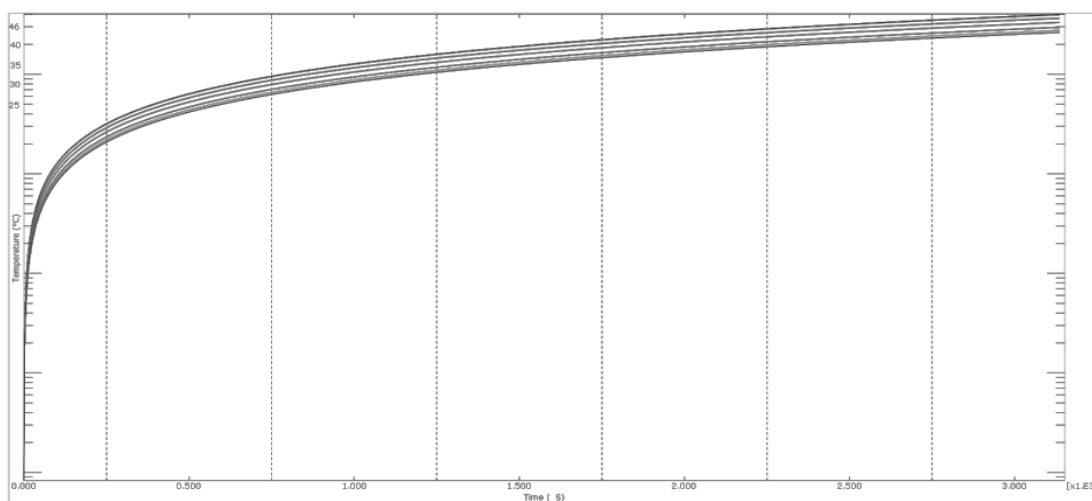


Figure : 25 La variation de température de la phase transitoire juste a la phase stationnaire en 3600s, et comparaison avec les résultats expérimentaux

5 Conclusion

La pomme de terre, comme tout autre produit agricole, au cours de son cycle de vie, est sollicitée à diverses contraintes thermiques : conduction, convection et rayonnement (phase de récolte; transport, stockage et transformation industrielle). Le phénomène de convection reste le plus important de tous ces cycles, nous avons limité l'intervalle de conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$) ($0.32 < k < 0.6$) et nous avons prouvé que ce n'est pas une valeur fixe qui explique notre choix.

La conductivité thermique est un facteur déterminant pour contrôler et maintenir la pomme de terre en bon état afin de garantir sa qualité (goût et forme). L'étude expérimentale réalisée au cours de ce chapitre vise à optimiser au maximum la quantité d'énergie nécessaire pour maintenir le produit dans ses meilleures conditions en déterminant la vitesse de température lors de la transformation industrielle ou lors de la cuisson des aliments d'autant plus que la pomme de terre est utilisée à chaque fois dans ces zones à fort impact économique. En perspective, nos travaux seront suivis d'une étude thermomécanique plus approfondie et d'une caractérisation appuyée par des simulations numériques.

Dans ce travail, nous avons donné un aperçu de l'état actuel de la modélisation numérique dans le cas de l'étude des pommes de terre nouvelles et crues avec un focus sur les caractéristiques des méthodes numériques (DF, FE).

Des méthodes numériques unidimensionnelles simples ont été présentées pour estimer le temps nécessaire d'homogénéisation de la chaleur dans les échantillons qui est égale à 14 minutes.

La source d'énergie est fixée au début de la simulation numérique, avec l'utilisation d'un modèle géométrique simple associé à un certain nombre d'hypothèses et d'estimations. Le développement des méthodes et des moyens numériques demande des hypothèses qui concernent les conditions aux limites et les propriétés des matériaux tout en prenant en compte les simplifications nécessaires.

Pour ce travail, la comparaison entre les valeurs expérimentales et les résultats numériques des ajustements est corrélée. Ce résultat est très significatif et exploitable afin d'optimiser l'énergie thermique.

Chapitre 3 : COMPORTEMENT MECANIQUE ET RHEOLOGIQUE DE POMME DE TERRE

1 INTRODUCTION

Les propriétés mécaniques telles que la dureté, les propriétés rhéologiques, la résistance à la compression, la résistance aux chocs et aux cisaillements affectent les diverses opérations de transformation agricole. L'importance des essais vient du fait qu'il est nécessaire de déterminer les propriétés mécaniques et physiques, qui sont des conditions obligatoires pour déterminer l'identité du matériau et limiter les zones de son fonctionnement en toute sécurité. Les types de contraintes mécaniques imposées et la réponse attendue permettent de sélectionner le matériau adéquat élastique ou viscoélastique tout en prenant en compte l'influence des facteurs environnants. Par conséquent, il est important dans les essais de prendre en compte deux facteurs : la température et le taux de sollicitation, notamment dans le cas des matériaux agricoles, en particulier la pomme de terre, à cause de leurs formes complexes et de la quantité d'eau dans chaque type, ceci rend l'interprétation assez difficile.

L'étude de la relation contrainte-déformation varie dans le temps, dans ces cas, il devient donc nécessairement obligatoire d'admettre le modèle rhéologique approprié afin de déterminer les propriétés mécaniques et physiques pour valider le test de fluage et de relaxation et réussir la simulation par EF.

2 COMPORTEMENT MECANIQUE

Classification des propriétés mécanique des matériaux agricoles ;

Les propriétés mécaniques peuvent être définies comme celles qui affectent le comportement du matériau agricole sous l'effet de la force appliquée (Singh, 2014). Les données sur ces propriétés sont utiles à mettre en œuvre pour concevoir des équipements pour la manutention, le stockage, le transport et la transformation des aliments, etc.

Les propriétés mécaniques des matériaux agricoles peuvent être classées en trois groupes : propriétés mécaniques de base, analyse du comportement viscoélastique et type de tissu. Ces propriétés sont généralement générées à partir de trois résultats de l'essai ; contraintes, déformations et temps (Mohsenin, 1986). Le Produit agricole est soumis à une charge de traction/compression afin de mesurer de nombreuses propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité, la plasticité, la ténacité, la rigidité et la contrainte de rupture.

Ces propriétés ont été utilisées à deux objectifs, pour évaluer la qualité et empêcher la destruction du produit, et le principal facteur affectant l'apparition de dommages est la

résistance du tissu du tubercule. Les résultats obtenus par (Muir et al, 1990) ont indiqué des changements dans la résistance cutanée après la récolte en fonction de temps. Ainsi, la pomme a été considérée comme un matériau viscoélastique (Lu et al, 1988) ceci permet d'étudier la réponse de ce matériau aux sollicitations mécaniques en fonction du temps : la rhéologie alimentaire dont les matières réagissent à une contrainte ou une déformation appliquée.

La rhéologie a de nombreuses applications dans les domaines de l'agriculture, pour maintenir un bon produit pendant la récolte, le transport et la transformation (Krokida et al, 1999 ; Shahgholi et al, 2020). Il est important de bien étudier la contrainte et la déformation en fonction du temps pour comprendre la rhéologie des aliments. La Pression est un exemple de la contrainte normale (σ), elle peut être dans le cas de traction ou de compression selon le sens de la charge appliquée : qu'elle a tendance à étirer ou à comprimer le matériau sur lequel elle agit. En contrainte de cisaillement, la contrainte agit tangentielllement à la surface. La contrainte de cisaillement (τ) est définie comme la force appliquée parallèlement au plan (Figure 26) (Sahin, and Sumnu, 2006)

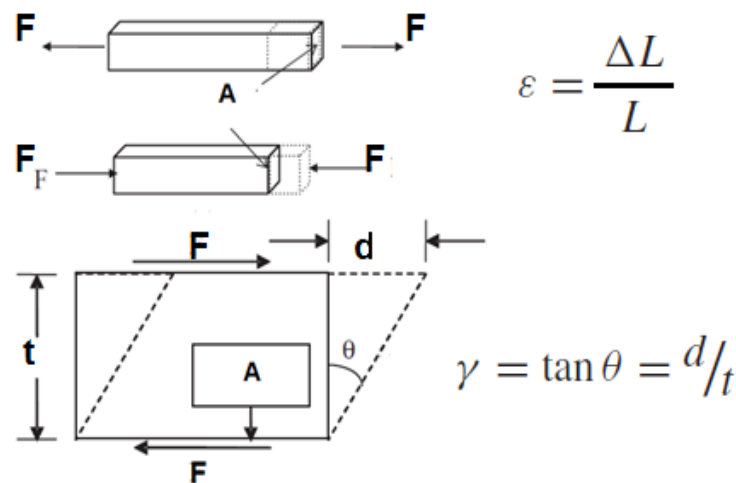


Figure : 26 Contrainte normale de traction et de compression et de cisaillement

2.1 Relation entre les propriétés mécaniques :

Après détermination des paramètres de pomme de terre considérés comme un matériau viscoélastique : une relation entre la réponse aux contraintes mécaniques et le temps (Salençon,1983). Lors d'un essai de traction ou de compression, la vitesse des déformations affecte directement la réaction du matériau.

Deux approches de la viscoélasticité sont possibles : une approche dans le domaine temporel et une approche dans la fréquence (Markovitz,1977) comme hypothèse ; dans le cas où le matériau est isotrope, les quatre constantes élastiques que nous avons considérées sont inter

convertibles et, si deux d'entre elles sont connues, alors l'une des autres peut être calculée. Lorsque les propriétés des solides diffèrent dans différentes directions (anisotropes), des constantes supplémentaires sont nécessaires. La relation entre ces propriétés est résumée comme suit :

Module d'élasticité transversal G (ou module de Coulomb) :

$$G = \frac{3EK}{9K-E} \quad (60)$$

Module d'Young :

$$E = \frac{9GK}{3K+G} \quad (61)$$

$$E = 2G(1 + \mu) \quad (62)$$

$$E = 3k(1 - 2\mu) \quad (63)$$

le module de compression (K) :

$$K = \frac{2G(1+\mu)}{3(1-2\mu)} \quad (64)$$

$$K = \frac{EG}{3(3G-E)} \quad (65)$$

Coefficient de Poisson : $\mu = \frac{E-2G}{2G}$

$$\mu = \frac{1}{2} \frac{(3K-E)}{3K} \quad (66)$$

Ces propriétés des matériaux peuvent être déterminées par une série d'expériences relativement simples.

Ces propriétés doivent avoir un effet sur la consistance des aliments (pommes de terre), et pour cela nous avons réalisé des tests pratiques.

3 Matériels et méthodes

3.1 Essais expérimentaux

Des essais classiques ont été réalisés dans des conditions de température ambiante, à l'aide d'une machine de traction numérique utilisée pour extraire les propriétés mécaniques des pommes de terre soit directement, soit par des modèles théoriques utilisés dans la suite de l'étude par plusieurs modèles numériques et aussi pour justifier le comportement rationalisé de ce produit plus remarquable. Les tests de résistance à la traction restent les plus courants et seront appliqués sur deux variétés tout au long de notre étude.

3.1.1 ESSAI DE TRACTION

Les résultats des essais de traction sont utilisés pour sélectionner les matériaux pour différentes applications. Les propriétés de traction sont souvent incluses dans les spécifications des matériaux pour garantir la qualité. Les propriétés sont souvent mesurées lors du développement de nouveaux matériaux et procédés, de sorte que différents matériaux et procédés peuvent être comparés. Les propriétés de traction sont souvent utilisées pour prédire le comportement d'un matériau suivant les formes. La résistance d'un matériau est souvent la plus importante préoccupation. La force d'intérêt peut être mesurée en termes de contrainte requise pour provoquer une déformation élastique ou une contrainte maximale que le matériau peut supporter. Ces propriétés de cet essai sont utilisées par plusieurs littératures fondamentales.

Préparation de l'éprouvette

Les essais de traction donnent une déformation exploitable pour déterminer le module d'élasticité. Contrairement à la compression, les essais de traction sont beaucoup plus difficiles à réaliser, principalement à cause du problème de préhension, mais aussi parce que la préparation d'une éprouvette appropriée pour les essais peut nécessiter des considérations particulières (Luyten et al, 1992; Chen et al, 1994). Un modèle, qui porte des modifications par rapport aux modèles connus, donc a été proposé, on a essayé de minimiser aux maximum les contraintes géométriques de l'éprouvette qui ont été référenciées (Bourne, 1982, Canet et al, 2009) Figure 27.

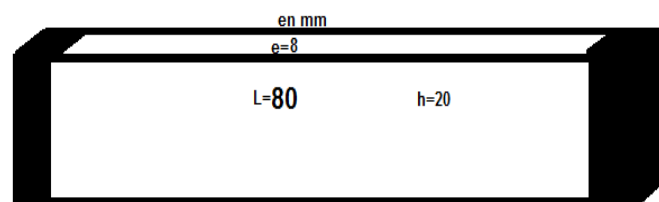


Figure : 27 Dimensionnement de l'éprouvette, l=80mm, s=160mm²

La Figure 28 montre les détails de préparation de l'éprouvette et sa fixation sur la machine de traction-compression, Figure 29.

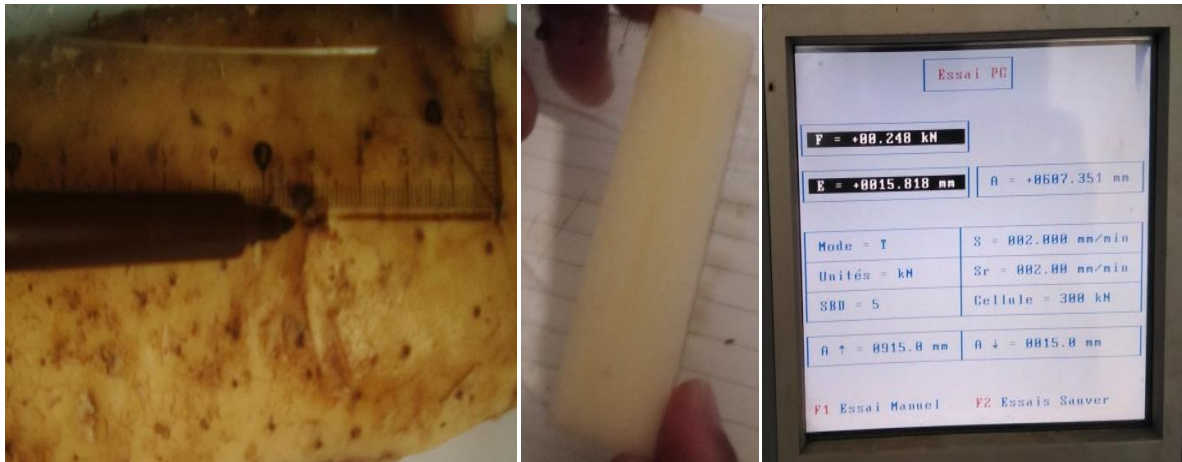


Figure : 28 Préparation de l'échantillon, et fixation des conditions de l'essai

3.1.1.1 Résultats et discussions

Après avoir fixé les conditions de l'essai nécessaires, on a mis la machine en marche jusqu'à la rupture de l'échantillon toute en enregistrant les mesures pour extraire la courbe suivante (Figure 30 /31).

On remarque l'existence de trois zones : une zone élastique linéaire, une deuxième zone non linéaire (matériau viscoélastique), cette propriété principale est mise en œuvre en chargeant une éprouvette de Spunta puis en la déchargeant afin qu'elle puisse reprendre par la suite sa forme de nouveau (Sinha and Bhargav, 2020).

Une troisième zone a été visualisée où le matériau est endommagé. Ces résultats seront détaillés après les essais de compression (chaque test d'essais a été répété cinq fois). A souligner que le début de la fracture peut être facilement observé, durant cet essai, car cette dernière est presque toujours visualisée à l'extérieur de l'échantillon. Les délais de préparation de l'échantillon ainsi que le choix des machines adéquates peuvent également provoquer des erreurs.

On remarque que le module d'élasticité de Spunta est légèrement inférieur à celui de Daifla, ceci peut être expliqué par la morphologie, le comportement physico-chimique et la teneur d'humidité de chacune (chapitre04) :

$$E(spunta) = 3 \sim 3.4MPa$$

$$E(dai fla) = 3.9 \sim 4.2MPa$$

Ces valeurs trouvées expérimentalement sont acceptables (Álvarez et al, 1998).



Figure : 29 Fixation de l'éprouvette et déroulement de l'essai de tractions

Les Figures suivantes illustrent la relation contrainte-déformation pour les deux variétés étudiées respectivement Daifla /Spunta, et aussi la réponse de pomme de terre dans le cas de chargement et déchargement.

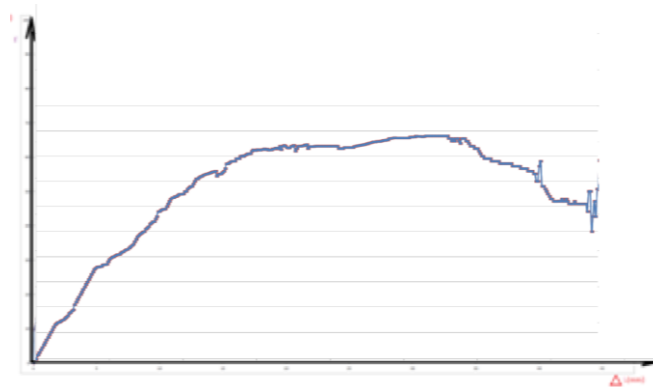


Figure : 30 courbe contrainte – déformation obtenue a partir de la texture Daifla

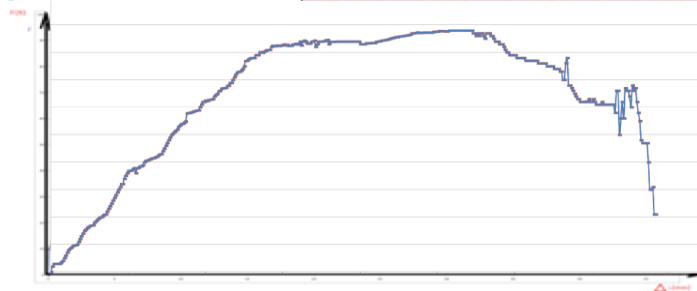


Figure : 31 courbe contrainte – déformation obtenue a partir de la texture Spunta

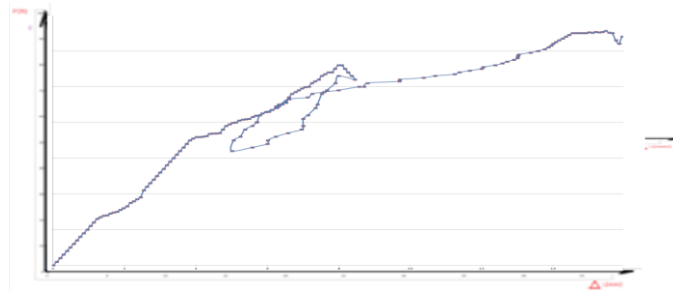


Figure : 32 essais cycliques de chargement et de déchargement d'une éprouvette de pomme de terre (Spunta)

L'échantillon est soumis à une boucle d'hystérésis pendant le chargement et le déchargement cyclique (Figure 33). La perte d'énergie est due à la composition moléculaire influencée par la contrainte durant le chargement et le déchargement de l'éprouvette dans la zone élastique. Ce comportement observé confirme la nature viscoélastique de la pomme de terre.

3.1.2 Essai de compression

L'essai de compression uniaxiale est le moyen le plus courant pour déterminer les propriétés de contrainte-déformation des aliments mous et des matières biologiques en général, et la relaxation des contraintes est basée sur l'essai de compression (Canet et al, 2007).

Les propriétés mécaniques des aliments sont le plus souvent déterminées par des essais de compression, principalement en raison de la facilité de préparation des échantillons et de la simplicité des performances de l'essai (Bourne, 1982; Luyten et al, 1992). En conséquence, il y a eu un nombre considérable d'études sur la résistance à la compression des pommes de terre (Chu and Peleg, 1985; Scanlon and Long, 1995).

Un protocole d'essai normalisé pour la détermination des propriétés rhéologiques par des essais de compression uniaxiale, la vitesse de chargement de l'éprouvette de pommes de terre est faible. L'inconvénient du test de compression, cependant, est que le frottement entre l'échantillon et les plaques de chargement conduit à un état de contrainte-déformation inhomogène dans l'échantillon (Alvarez et al, 1998).

3.1.2.1 Préparation de l'éprouvette PDT

Une procédure expérimentale a été mise en place en mesure de calculer certains de ces paramètres. Les études expérimentales ont été réalisées dans le laboratoire d'essais (ISET EL KEF) sur une machine de traction numérique (Figure 33), des éprouvettes cylindriques ont été utilisées (dimensions des éprouvettes : 20 x 25 mm) de tubercules de pomme de terre

(Caglayan et al, 2018), le but de ces essais est d'extraire les données de la réponse des matériaux à cause de leur impact direct sur le transport ou les différents modes de stockage.

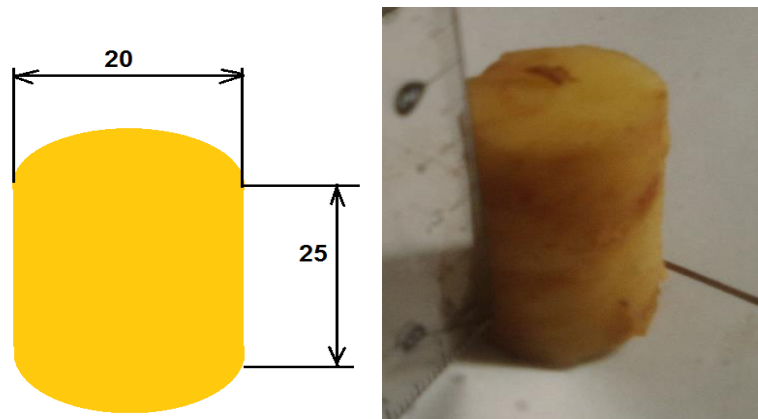


Figure : 34 le choix de position de l'éprouvette

La température d'essai est de 24 ° C. La vitesse de déplacement nominale en compression est de 2,5 mm / min en régime permanent, des courbes contrainte/déformation ont été obtenues à partir de l'application de force/déplacements.

3.1.2.2 Résultats et discussions

La détermination de module d'élasticité de pomme de terre demande des machines de traction précises à cause de la sensibilité et la nature de type des matériaux biologiques étudiés.

La figure suivante montre la réponse de matériau suite à l'essai de compression détaillé dans la partie ci-dessus.

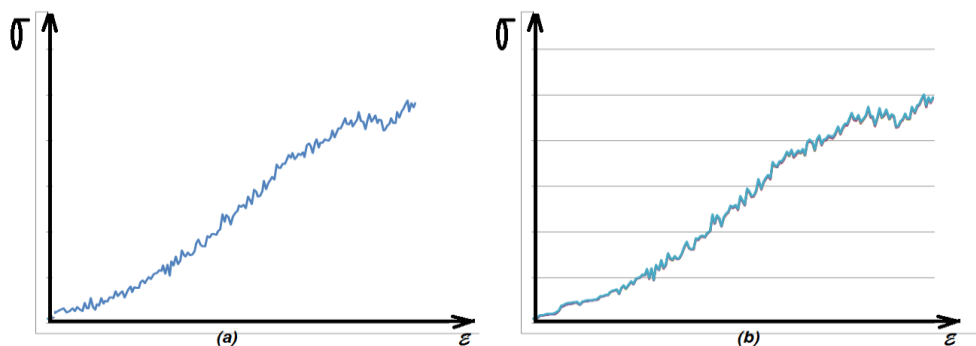


Figure : 35 courbe contrainte – déformation obtenue à partir de la texture Daifla (a) Spunta(b)

Les courbes contrainte–déformation des deux variétés présentent les mêmes allures. Les modules d'élasticité de chacune sont cadrés entre 4 et 4,5 MPa.

On peut également en déduire qu'il existe de nombreux cas de glissements sous l'effet des charges dues au comportement non élastique et que l'essai de chargement et de déchargement explique mieux la viscoélasticité de ce matériau.

4 Comportement rhéologique des matériaux

La difficulté expérimentale démontre la complexité des propriétés rhéologiques des produits alimentaires, car cette dernière regroupe toutes les caractéristiques connues sous l'effet des comportements de vieillissements (Figure 35). Pour obtenir des résultats significatifs, il est nécessaire de disposer des méthodes expérimentales, pour observer les effets des déformations appliquées et aussi pour extraire les valeurs qui remplissent les modèles en fonction de temps et de la température (Kubo, M and al, 2019).

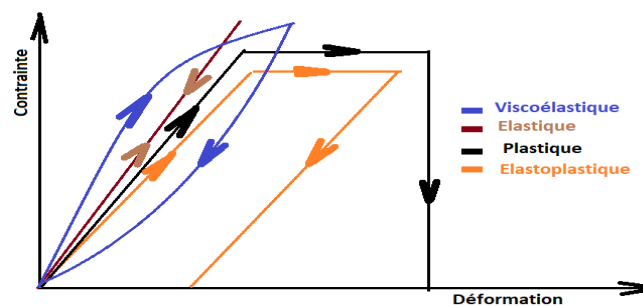


Figure : 36 réponses des matériaux à une vitesse de déformation constante

Toutes les substances naturelles s'écoulent dans une certaine échelle de temps t , le nombre de Deborah (De), est une grandeur sans dimension qui décrit le mouvement de la matière, il permet de mesurer l'écoulement en fonction du temps (rhéologie) ; (Reiner, 1964 ; Huilgol, 1975)

$$De = \frac{\text{temps de relaxation}}{\text{Temps d'observation}} = \frac{k}{t}$$

Après cela, il reste à dire que De est l'un des critères importants dans toute substance réelle, ces réarrangements (relaxation) nécessitent nécessairement un temps limité.

*En conséquence, un matériau apparaît comme un liquide si le nombre Deborah De est petit, et comme un solide s'il est grand, par rapport au temps d'observation.

A partir de $De \gg 1$, la structure du marteau étudiée n'est pas profondément modifiée au cours du temps durant l'expérience, seulement ses déformations élastiques (comportement Hookienne). Le matériau se comporte comme un solide élastique.

- Lorsque $De \ll 1$, dans ce cas l'écoulement est visqueux dans le temps, on voit le matériau se comporter comme un liquide (newtonienne),

- Quand De approche 1, un comportement intermédiaire entre les deux cas précédents, alors c'est le comportement viscoélasticité.

4.1 Comportement mécaniques des aliments solides

Les théories classiques décrivant le comportement mécanique ont été développées sur la base des matériaux élastique (pour les solides) et visqueux (pour les liquides) idéals .Cependant, en réalité, ces théories ne sont pas facilement étendues à expliquer le comportement de nombreux matériaux réels, beaucoup moins dans le cas des matériaux alimentaires. Lorsqu'une force est appliquée à un fluide visqueux, il commence à se déformer et cette déformation est proportionnelle avec l'ampleur de la force appliquée, il se déforme continuellement jusqu'à ce que la force soit enlevée. Les fluides présentent généralement une viscosité tandis que les solides présentent une élasticité.

Certains aliments présentent à la fois des propriétés visqueuses et élastiques (exemple la pomme de terre), appelés matériaux viscoélastiques. Cependant, en combinant le comportement élastique et visqueux, dans le but à expliquer une partie du comportement réel observé des matériaux.

Ce comportement combiné a à la fois les propriétés des matériaux solides et des matériaux liquides, il est généralement appelé le comportement viscoélastique. L'une des plus importantes caractéristiques du comportement viscoélastique est la dépendance des propriétés du matériau dans le temps, en plus de la température et de la teneur en humidité. La réponse des solides peut être expliquée par des théories d'élasticité et la partie fluide par la viscosité. En rhéologie, deux essais quasi-statiques de base sont généralement effectués pour expliquer le comportement viscoélastique des matériaux alimentaires et d'obtenir un aperçu de leur comportement mécanique (Barbosa-Cánovas, 2009). Ils sont connus par la relaxation, la contrainte et le fluage.

5 LA VISCOELASTICITE

Afin de comprendre le spectre complet du comportement mécanique des biomatériaux mous, une étude est donc nécessaire afin d'améliorer les limites des études précédentes. Car sans

comprendre le comportement mécanique, il serait impossible de prédire le comportement de ces matériaux dans des scénarios de chargement complexes.

La viscoélasticité est observée comme une combinaison de déformation élastique récupérable et de déformation visqueuse permanente (Figure 36). La déformation visqueuse s'est avérée conduire à une déformation permanente (fluage) dépendant du temps sous une contrainte constante instantanée. De même, sous contrainte ou déformation constante instantanée, la déformation visqueuse peut provoquer une relaxation des contraintes. Presque tous les biomatériaux, présentent une viscoélasticité à des degrés divers.

De nombreux matériaux, principalement agricoles, présentent un comportement plus compliqué. Les matériaux viscoélastiques se déforment sous une charge ou une contrainte de cisaillement constante. Suite à l'interprétation du fluage et de la relaxation, plusieurs chercheurs ont montré que les fruits et légumes présentent un comportement viscoélastique. La déformation est mesurée en fonction du temps.

Le principal avantage des essais de conformité au fluage est que l'analyse peut être facilitée par le modèle de Burgers.

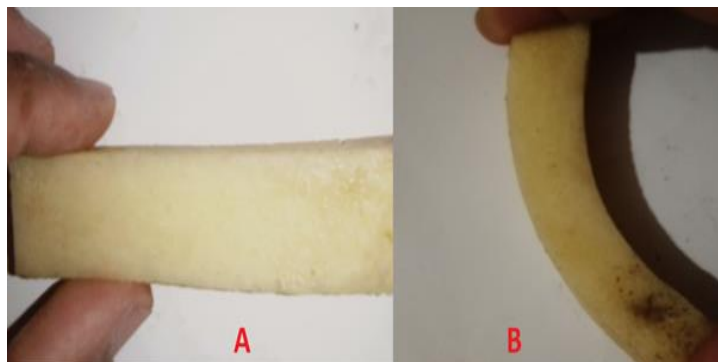


Figure : 37 réponse de la pomme de terre aux chargements et déchargement

5.1 Modèles mathématiques pour la réponse viscoélastique linéaire

5.1.1 Matériels et méthodes

5.1.1.1 Le modèle MAXWELL :

Le développement de la réponse viscoélastique d'un marteau est modélisé par un ressort monté en série avec un amortisseur. Cette étude permet de mettre en évidence les deux réponses de la matière à l'échelle microscopique, instantanée et retardée, et toutes les deux doivent être décrites dans la même équation différentielle en fonction du temps, Ces relations sont un moyen de développer ce qui se passe en pratique pour comprendre les mouvements moléculaires.

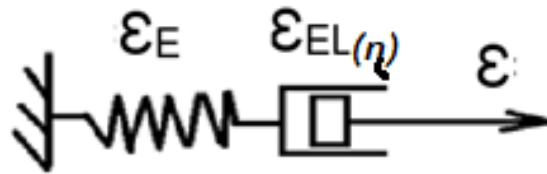


Figure 38: modèle de MAXWELL

Le "Maxwell" illustré à la (Figure 37) est un modèle mécanique dans lequel un ressort Hookéen (partie élastique) et un amortisseur newtonien sont connectés en série, le ressort représentant la composante élastique ou énergétique de la réponse, tandis que l'amortisseur représente la composante visqueuse. Dans une connexion en série comme le modèle de Maxwell, la contrainte sur chaque élément est la même et égale à la contrainte imposée, tandis que la déformation totale est la somme de la déformation dans chaque élément :

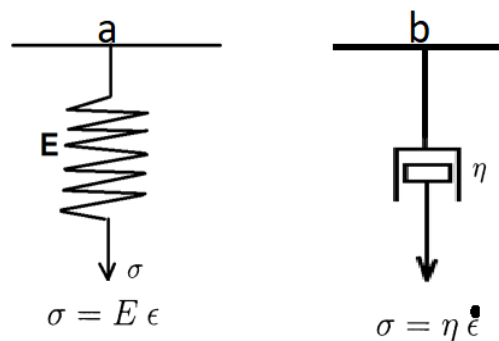


Figure : 38 (a) le ressort présente le comportement élastique
(b) l'amortisseur présente les comportements du matériau visqueux

Dans ce cas, le ressort et l'amortisseur subissent la même contrainte σ appliquée à l'ensemble du système ($\sigma = \sigma_E = \sigma_{EL}$), le résultat de la déformation ϵ est la somme des déplacements du ressort (élastique) et de l'amortisseur (visqueux) ($\epsilon = \epsilon_E + \epsilon_{EL}$) (Weinerowska-Bords, 2006; Dey and Basudhar, 2010)

Loi de comportement

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (67)$$

5.1.1.2 Modèle de KELVIN - VOIGHT

Présents parmi les formes les plus simples de modèles rhéologiques d'un matériau viscoélastique, est obtenu en connectant un ressort (élastique) et un amortisseur (visqueux) en

parallèle comme le montre la Fig, alors le système subit la même déformation ($\varepsilon = \varepsilon_E = \varepsilon_{EL}$). La contrainte totale du système est la somme des contraintes $\sigma_t = \sigma_E + \sigma_{EL}$:
(Yannas and Spector, 2004).

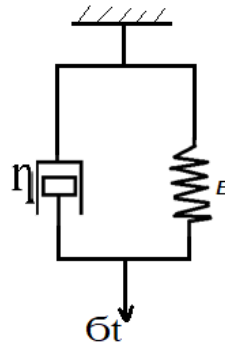


Figure : 39 modèle de KELVIN - VOIGT

La contrainte de la résistance du ressort :

$$\sigma_E = \varepsilon_E E_E \quad (68)$$

De même la contrainte de la résistance de l'amortisseur :

$$\sigma_{EL} = \eta \frac{d\varepsilon_{EL}}{dt} \quad (69)$$

Par conséquent, nous pouvons écrire que la charge totale du système peut s'expliquer par l'équation suivante

$$\sigma_t = \sigma_E + \sigma_{EL} \quad (70)$$

Donc

$$\sigma_t = \varepsilon_E E_E + \eta \frac{d\varepsilon_{EL}}{dt} \quad (71) \text{ avec } (\varepsilon = \varepsilon_E = \varepsilon_{EL}),$$

Ce qui donne

$$\sigma_t = \varepsilon_t E_E + \eta \frac{d\varepsilon_t}{dt} \quad (72)$$

L'équation différentielle de la déformation totale s'écrit donc :

$$\frac{\sigma_t}{\eta} = \varepsilon_t \frac{E_E}{\eta} + \frac{d\varepsilon_t}{dt} \quad (73)$$

A comme solution

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma}{\eta} \left(1 - e^{\left(-\frac{t E_E}{\eta} \right)} \right) \quad (74)$$

Cette équation relie la contrainte à la déformation et à la vitesse de déformation pour le modèle de Kelvin-Voigt (Figure 39), qui est un modèle viscoélastique à deux paramètres (E et η). L'équation est une équation différentielle du premier ordre. Pour une contrainte donnée peut

être résolue pour la déformation correspondante. Le ressort représente l'élasticité et l'amortisseur représente le comportement visqueux des matériaux.

5.1.2 Critères de choix du modèle étudié

Le modèle de Burger indique que le comportement des matériaux agricoles (pomme de terre, tomate) sous contrainte a un comportement viscoélastique qui peut être représenté par un ressort (représentant le comportement élastique) en série avec le commun amortisseur, (représentant le comportement visqueux) ressort en parallèle (Álvarez et al,1998 ; El-Maksoud et al, 2009; Albaloushi, 2012). Étant donné que le comportement complexe de ces types produit, il est très important de compléter le maximum des données pour l'identifier à travers l'essai de fluage, c'est-à-dire que l'analyse peut être facile avec ce modèle (Figure 40). Un plus grand nombre de paramètres rhéologiques peut être estimé et les propriétés d'écoulement élastique, viscoélastique et visqueux peuvent être prédites séparément (Chu and Peleg, 1985).

Les paramètres du modèle peuvent ainsi être corrélés avec les composants discrets du produit testé, afin de réaliser un mécanisme qui reflète les changements de microstructure, dans ce cas, notre approche est basée, la première étape sur une étude expérimentale pour collecter et déterminer les propriétés mécanique et physique possible. On peut alors retrouver les propriétés rhéologiques à partir de la résolution par éléments finis au moyen d'une simulation numérique qui a été correctement tracée en fonction de la déformation/temps.

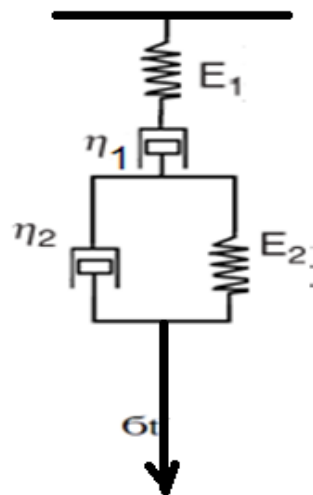


Figure : 40 le modèle Burger était composé des modèles Maxwell et Kelvin en série

5.1.3 Etude du mécanisme du modèle rhéologique choisi

Les modèles rhéologiques ont été un outil utile pour évaluer et prédire la réponse mécanique des aliments à la force (ou contrainte-déformation). Les propriétés rhéologiques de nombreux

aliments solides ont été évaluées, en général, par des tests impliquant le fluage, la compression et la traction. Le comportement rhéologique d'un matériau en plus de ses propriétés sensorielles est régi par la structure physique et la composition biochimique qui déterminent ses propriétés structurelles.

En général, la combinaison d'éléments mécaniques (généralement ressorts et amortisseur) peuvent être utilisés pour modéliser la viscoélasticité (réponse des matériaux agricole) afin de faire avancer et de comprendre comment le système va répondre en cas de fluage et le comportement de récupération, plusieurs modèles classiques sont présents.

Le modèle de Burgers était un modèle largement utilisé pour représenter le comportement de ces types des matériaux, en connectant une unité Maxwell et une unité Kelvin en série, le modèle Burgers divise la contrainte de fluage d'un matériau polymère en trois types de déformation (Álvarez and al 1998 ; El-Maksoud and al 2009; Dey and Basudhar 2010 ; Albaloushi 2012):

Déformation instantanée :

$$\varepsilon_{E1} = \frac{\sigma}{E_{E1}}$$

Et déformation plastique (résiduelle) :

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{\eta_1}$$

La déformation élastique retardée du modèle Voigt uniquement ::

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma}{E_2} (1 - e^{(-\frac{tE_2}{\eta_2})}) \quad (75) \quad \text{Ou contrainte de cisaillement } \zeta = \frac{\eta_2}{E_2}$$

$$\frac{\sigma}{\eta_2} = \frac{d\varepsilon_2}{dt} + \frac{E_2}{\eta_2} \varepsilon_2 \quad (76)$$

La déformation globale du système peut être décrite par l'équation suivante :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{E1} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (77)$$

Où les indices E_i, η_i correspondent à l'évolution de la réponse des matériaux en fonction du temps, élastique, viscoélastique et viscoplastique. Cette fonction temporelle de $\varepsilon(t)$ ainsi, le comportement au fluage peut être le suivant :

$$\varepsilon(t) = \sigma \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{(-\frac{tE_2}{\eta_2})} \right) \right] \quad (78)$$

Où E_1 et E_2 sont les modules d'élasticité des éléments élastiques, η_1 et η_2 sont des éléments visqueux dans les amortisseurs, σ et t sont respectivement la contrainte appliquée et le temps de fluage.

Le fluage est une déformation lente et continue d'un matériau sous contrainte constante. Contrairement aux métaux ordinaires, les matériaux agricoles subissent un fluage même à température ambiante. Une déformation instantanée (ϵ_0) proportionnelle à la contrainte appliquée est observée après l'application de la contrainte et ceci est suivi d'une augmentation progressive de la déformation comme le montre la Figure 41.

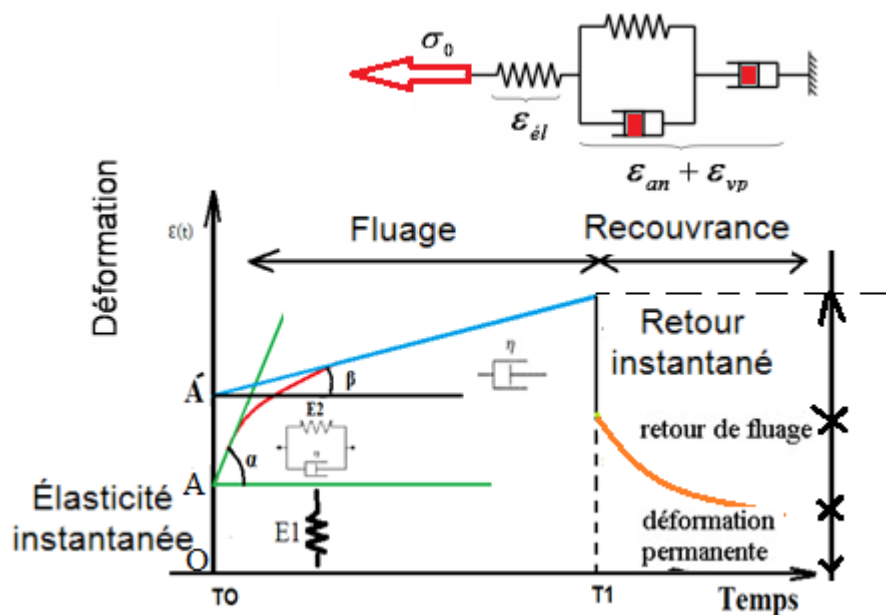


Figure : 41 Le comportement correspondant au temps de déformation viscoélastique du modèle Burger

La déformation totale à tout instant est représentée par la somme de la déformation élastique instantanée et de la déformation de fluage. Le processus de fluage de matériaux viscoélastiques peut être divisé en trois étapes typiques (déformation instantanée, primaire et fluage secondaire (Figure 41). Pour des matériaux viscoélastiques linéaires idéaux, la déformation instantanée représente la propriété élastique du matériau. La déformation récupération instantanée est généralement égale à la déformation de fluage instantanée. La déformation élastique retardée est produite dans le fluage primaire, et il faut du temps pour une récupération complète. La contrainte d'écoulement visqueux est produite dans le fluage secondaire, qui est une composante irréversible de la déformation (Majda And Skrodzewicz, 2009 ; Dogan et al, 2013).

L'équation ci-dessus a quatre inconnues qui peuvent être déterminées à partir de la courbe de fluage et des conditions initiales suivantes à $t = 0$:

$$\varepsilon(t=0) = \varepsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E_1}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$$

où σ_0 / E_1 est le phase de départ de déformation qui est causé par le ressort 1. La vitesse de fluage au départ $t = 0$ peut être trouvée en différenciant l'équation de déformation du modèle de Burgers :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma_0}{\eta_1} + \left(\frac{\sigma_0}{\eta_2} \right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (79)$$

η_1 est la pente de la fonction de fluage au temps infini ($t = t_1$) représenté ($\text{tg } \beta$) à partir de la courbe, l'angle β mesuré pour calculer η_1 à partir de l'équation suivante :

$$\varepsilon(t=t_1) = \varepsilon = \frac{\sigma_0}{\eta_1} = \text{tg } \beta \quad (80)$$

Après que le fluage élastique commence à $t = 0$ avec une déformation en fonction du temps, où se trouvent les paramètres explicatifs de cette phase (courbe), la valeur de η_2 peut être évaluée à partir de l'équation suivante :

$$t g \alpha = 6 \left(\frac{1}{\eta_1} + \frac{1}{\eta_2} \right) \quad (81)$$

Reste à déterminer E_2 comme E_1 directement de la courbe :

$$\Delta \dot{\varepsilon} = \frac{\sigma_0}{E_2}$$

selon le modèle de burger à quatre éléments, il faut calculer les constantes (E_1 , E_2 , η_1 , η_2), ici par la méthode graphique pour évaluer le fluage, c'est-à-dire la réaction du matériau étudié (El-Maksoud et al, 2009 ; Dey, and Basudhar 2010 ; Challob et al, 2015 ; Eroglu et al, 2016 ; Papanicolaou and Zaoutsos, 2019)

5.2 Approche par éléments finis

Ce qui suit détaille les principales étapes de la construction d'un modèle par éléments finis :

- discrétisation du milieu continu en sous-domaines ;
- construction de l'approximation nodale par sous-domaine ;
- calcule des matrices élémentaires correspondantes à la forme intégrale du problème ;
- regroupement des matrices brutes ;
- soumission à des conditions aux limites ;
- Résolution de système d'équations.

5.2.1 Simulation numérique

La simulation du modèle présenté a été réalisée sur ABAQUS / Logiciel éléments finis standard. La résolution de problèmes d'éléments finis (EF) à l'aide de modèles de simulation numérique est un outil très utile pour prédire comment les matériaux réagissent aux forces et autres effets physiques. Dans le cas de la pomme de terre, les modèles EF peuvent être utilisés pour étudier les rendements attendus aux charges de fluage à différentes températures.

5.2.2 Analyse du problème

Cette analyse doit déterminer les paramètres de calcul qui conduiront à déterminer les inconnues en chaque nœud. Cette étape dépend de la méthode suivie capable de faire correspondre le problème au schéma de convergence. La principale difficulté est de trouver un bon compromis entre les critères du problème, l'analyse de ceux-ci conduit à dégager un certain nombre d'hypothèses, et à faire des choix pour conditionner les résultats.

Les démarches d'introduire les données :

Afin de réussir le modèle numérique, les étapes suivantes seront nécessaires :

- paramètres physiques
- sollicitations
- vérifications des conditions aux limites
- coordonnées des nœuds
- définition des éléments « mailles »
- visualisation du maillage
- lecture du « fichier résultat » ou « questions-réponses-vérifications »
- création du fichier des données.

Après la représentation graphique, on introduit les paramètres des propriétés thermomécaniques du matériau, puis le choix du modèle numérique viscoélastique et leurs conditions nécessaires, avant d'entamer la phase d'assemblage.

On pose, par la suite, les conditions aux limites comme indiqué sur la Figure 42.

Une force de traction constante est appliquée à chaque fois sur la surface gauche, la surface de l'échantillon est bloquée de l'autre côté pour effectuer l'essai de fluage.

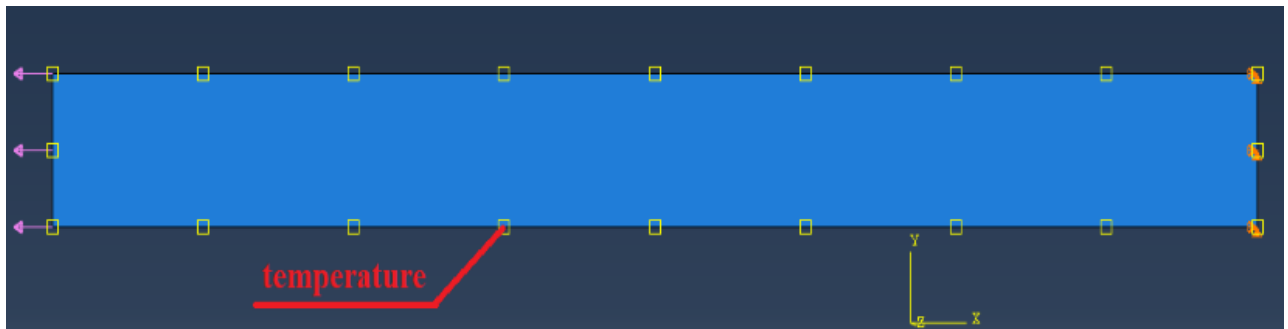


Figure : 42 les conditions aux limites

le comportement correspondant au temps de déformation viscoélastique du modèle de burger à quatre éléments .Après la création de step, et la fixation des charges nécessaires à chaque fois, on modifie la force et la température suivant le nombre d'essais (limité au début de l'essai), la discrétisation ou le maillage de pièce (simple dans ce cas : quadrilatères à 4 nœuds) est donnée par la Figure suivante :

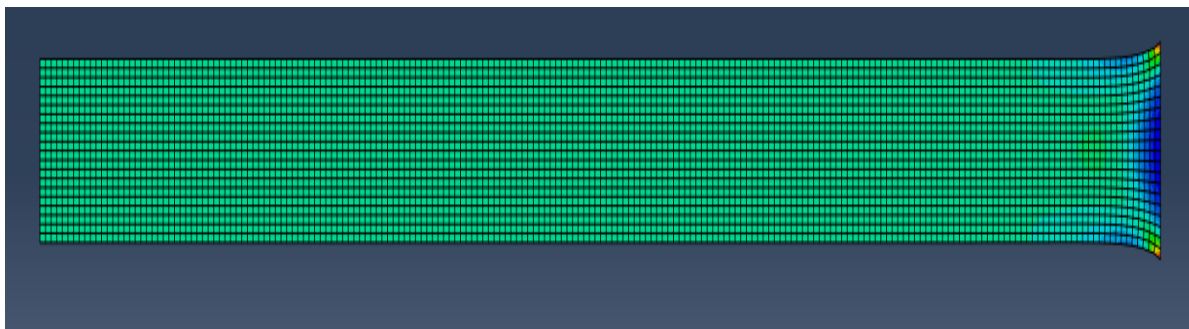


Figure : 43 Maillage de l'éprouvette

Les résultats de la simulation sont représentés par les courbes (47, 48, 49) ci-dessous, nous prenons les valeurs et nous les introduisons dans Excel afin de déterminer les paramètres de fluage à chaque fois les valeurs regroupés dans les tableaux (10, 11, 12). La Figure suivante présente la transformation à chaque phase et la sollicitation de chaque zone ;

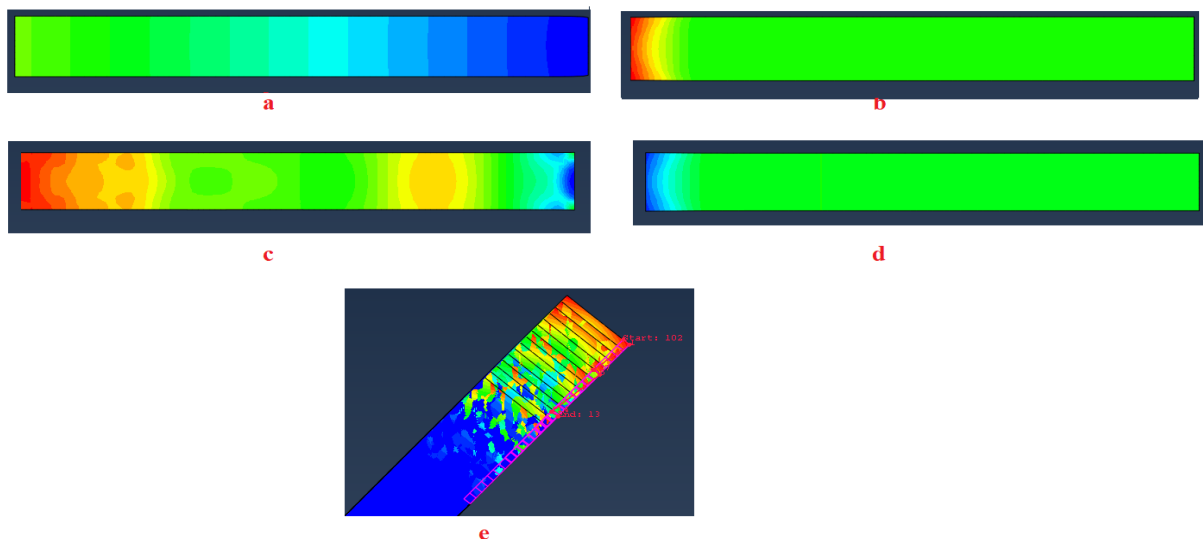


Figure : 44 Visualisation des résultats en fonction du temps
 (a) début de chargement, (b) état intermédiaire, (c) phase maximale de chargement, (e)
 éliminations de la force de retour libre du matériau

5.3 Résultats et discussion

La viscoélasticité est l'étude des matériaux qui présente à la fois un comportement élastique et visqueux. Ces caractéristiques des matériaux présentent une réponse de déformation dépendante du temps à contrainte constante (fluage).

Les Figures ci-dessous présentent la réponse d'une pomme de terre en utilisant le modèle standard de Burger viscoélastique à quatre paramètres (pour bien étudier la réponse des aliments, on peut introduire des modifications sur les connexions des modèles), dans lequel un élément Maxwell (ME) est connecté en série avec un élément Kelvin-Voigt (KV). Pour des contraintes restant constantes dans le temps, et avec modification de température et en l'absence de déformation initiale, la déformation dans l'élément de Burger à tout instant s'exprime comme suit :

Le premier terme exprime la déformation élastique qui apparaît instantanément après chargement et s'annule après la suppression de la charge.

Le deuxième terme représente la déformation de fluage irréversible dans l'élément une fois qu'il est soumis à une contrainte constante.

Le troisième terme exprime la déformation élastique retardée qui augmente sous la contrainte appliquée, puis récupéré une fois la contrainte levée et l'élément maintenu déchargé pour une durée indéterminée.

Les résultats sont utilisés dans les tableaux où l'on détermine à chaque fois tous les paramètres de ce modèle en quatre étapes de test et surtout les viscosités dynamiques du fluage premier et

secondaire qui seront les paramètres pour calculer à chaque fois la performance de fluage qui est représentée par la conformité de ce dernier. $J(t)$ définie comme le rapport entre la déformation de fluage $\varepsilon(t)$ et la contrainte appliquée (σ), en chaque phase, comme suit:

$$J(t) = f(E1, E2, \eta1, \eta2, \sigma) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} \quad (\text{Pérez et al, 2008}).$$

Les courbes représentées dans les figures 47, 48, 49 présentent le fluage et la récupération de pomme de terre pour un modèle de Burgers à $T=7^{\circ}\text{C}$, 25°C et 45°C .

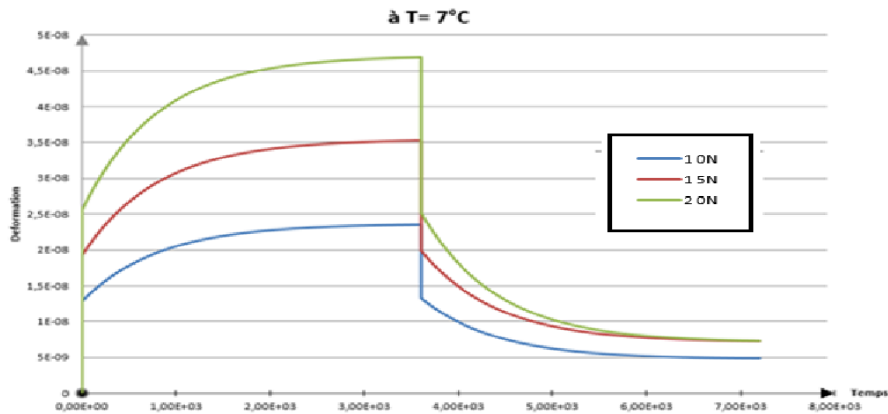


Figure : 45 Fluage et récupération de pomme de terre pour un modèle de BURGERS ($t=7^{\circ}\text{C}$)

Cette Figure représente la réponse du matériau suite à différents chargements, (de 10 à 20N) l'essai est effectué à une température fixée à 7°C .

Le tableau ci-dessous illustre les comportements viscoélastiques de pomme de terre.

Tableau : 10 Comportements mécaniques des éprouvettes étudiées

Equation	L'éprouvette	Paramètre	Résultat		
			10N	15N	20N
$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}})$					
OA=($\sigma_0 / E1$)	T=7°C	E1 (MPa)	3,2		
AA=($\sigma_0 / E2$)					
tg β =($\sigma / \eta1$)		$\eta1$ (MPa.s)	2,64E+04	7,45E+03	6,80E+02
tg α =($\sigma (1 / \eta1)+(1/\eta2)$)		$\eta2$ (MPa.s)	8,80E+03	1,91 E+04	1,81 E+04
		E2 (MPa)	5,1	4,64	4,56

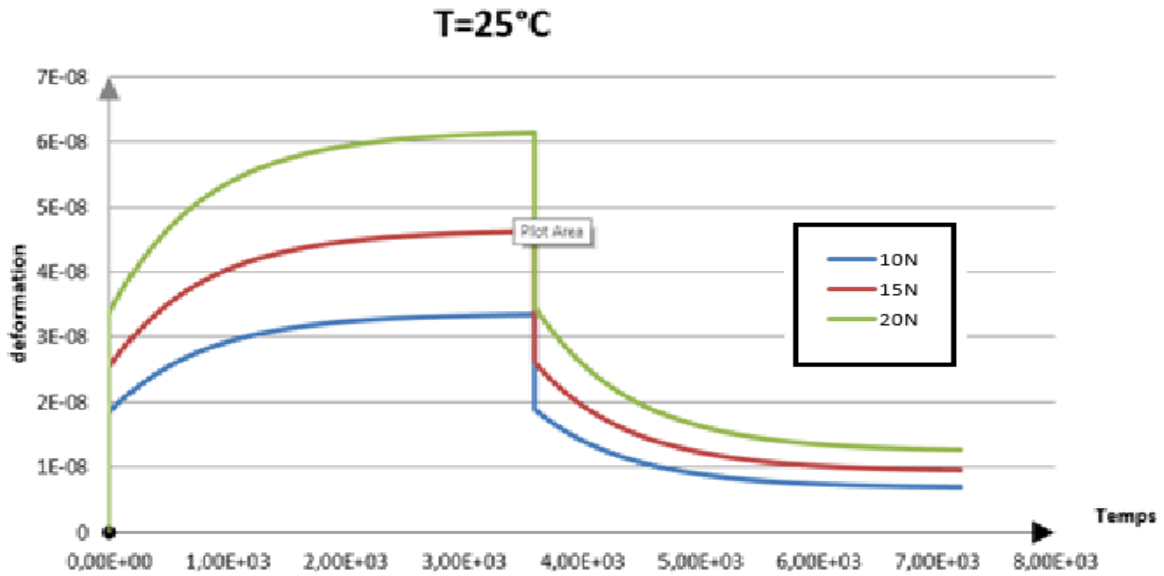


Figure : 46 Fluage et récupération de pomme de terre pour un modèle de BURGERS
(T=25°C)

La réponse du matériau suite à différents chargements, (de 10 à 20N) est représenté dans la Figure 46 l'essai est effectué à une température fixée à 25°C.

Le Tableau 11 regroupe les équations et les résultats des essais de fluage à une température de 25°C.

Tableau : 11 Constante de matériau déterminée a partir de la courbe d'essai de simulation de fluage. (T=25°C)

Equation	L'éprouvette	Paramètre	Résultat		
			10N	15N	20N
$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}})$					
OA=(σ0 /E1)	T=25°C	E1(MPa)	3,8		
AĀ=(σ0 /E2)					
tg β= (σ /η1)		η1 (MPa .s)	4,34E+04	5,67E+04	7,56E+04
tgα=σ * (1 /η1)+(1/η2)		η2 (MPa.s)	5,93E+03	5,05E+03	4,37E+03
		E2 (MPa)	5,57	6,31	6,38

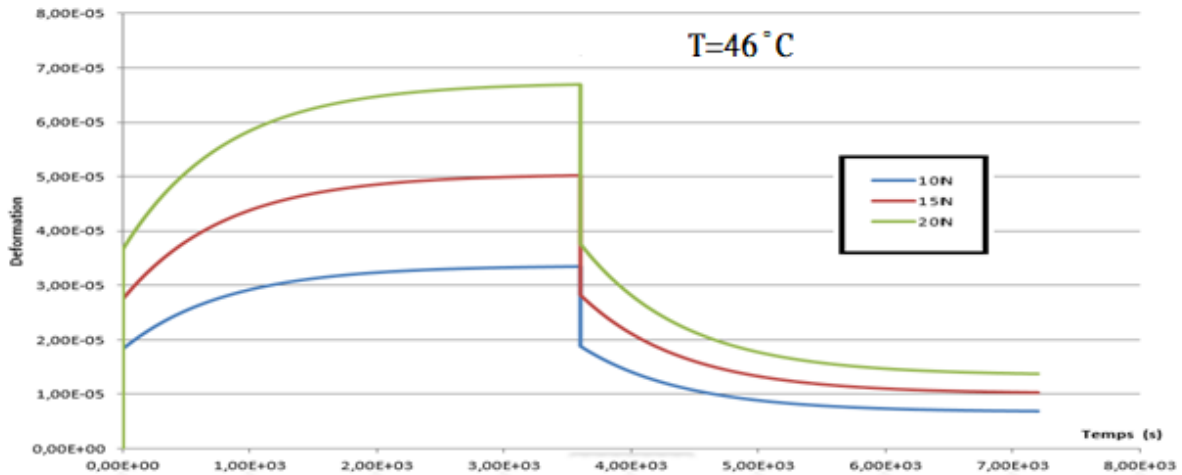


Figure : 47 Fluage et récupération de pomme de terre pour un modèle de BURGERS (t=46°C)

Le dernier essai a été effectué à une température de 46°C, les réponses du matériau aux chargements 10,15 et 20N sont représentées dans la Figure 47.

Le Tableau 12 regroupe les équations et les résultats des essais de fluage à une température de 46°C.

Tableau : 12 Constante de matériau déterminée a partir de la courbe d'essai de simulation de fluage. (T=46°C)

Equation	L'éprouvette	Paramètre	Résultat		
			10N	15N	20N
$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} + \frac{\sigma_0}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}})$					
OA= (σ_0 / E_1)	T=45°C	E1 MPa	4,2		
AA= (σ_0 / E_2)		η_1 (MPa.s)	5,97E+04	7,59E+04	8,69E+04
tg β = (σ_0 / η_1)		η_2 (MPa .s)	7,56E+03	5,26E+03	3,76E+03
tg α = $\sigma_0 (1 / \eta_1)+(1/\eta_2)$		E2 MPa	7,44	6,14	6,03

L'équation de conformité au fluage est évaluée selon les quatre éléments du modèle de Burger, où l'équation :

$$\epsilon(t) = \sigma \left[\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{\left(-\frac{tE_2}{\eta_2} \right)} \right) + \frac{t}{\eta_3} \right] \quad (12.3)$$

La constante de matériau a été déterminée à partir des données de la méthode expérimentale de l'essai de traction, et par la suite par l'outil numérique comme indiqué dans le tableau suivant.

Tableau 13 Comportement mécaniques des éprouvettes étudiées

T Variété :Spunta	T=7°C	T=25°C	T=46°C
Temps	t=24 h		
μ	0,46	0,39	0,32
E (MPa)	3,2	3,8	4,2
Résultats expérimentaux			
K=°C+273,15 °C=0,55(°F-32)			

L'analyse des forces constantes joue un rôle important dans l'étude de la résistance des pommes de terre et évite le seuil d'endommagement mécanique par déformation permanente. Aussi pour les charges, elles doivent être gérées de manière appropriée afin d'éviter de créer des déchets. Dans cette étude, les paramètres issus de l'expérimentale requis des échantillons de pomme de terre (Spunta) sont simulés par la méthode des éléments finis et ont donné la caractéristique du fluage, la contrainte et de la viscosité dynamique dans chaque phase.

Les résultats de simulation ont montré que la déformation augmente lorsque la charge augmente, mais aussi à partir des courbes on peut clairement observer l'effet de la température sur la viscosité (η_1, η_2) (Figure 48).

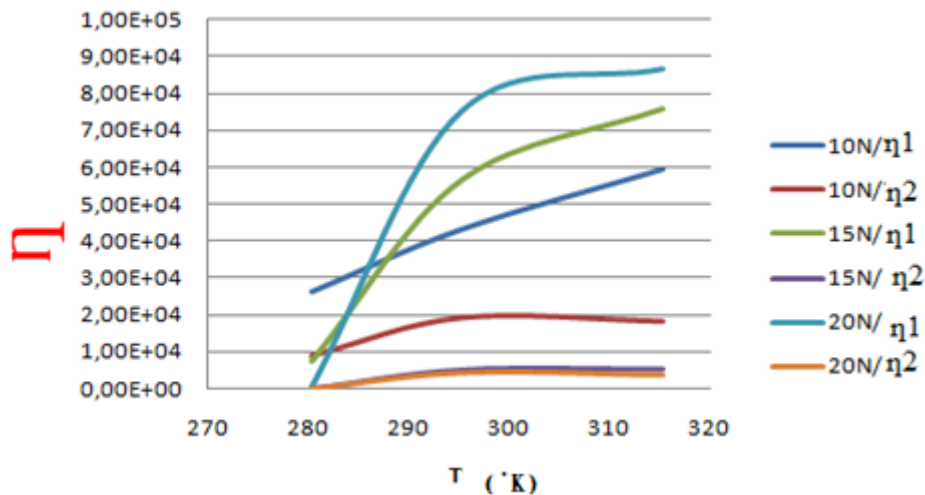


Figure : 48 L'effet de la température sur la variation des viscosités

Effet de la température sur le fluage retardé de la pomme de terre : on remarque que la déformation et les viscosités augmentent significativement avec la température.

Il faut éviter d'empiler plus de tubercules dans des conditions climatiques incontrôlées pendant longtemps, ce qui peut augmenter la pression indiquée au-delà de la valeur qui conduit à la concentration des contraintes, bien sûr, ces paramètres doivent être pris en compte dans le cas de stockage.

De manière générale, la connaissance du comportement des pommes de terre soumises à un chauffage modéré est un aspect important d'un grand nombre d'applications, et d'un intérêt particulier. En effet, l'augmentation de la température s'accompagne d'une diminution des propriétés mécaniques (dureté, résistance, etc.) due à l'effet physico-chimique provoqué par les effets liés aux contraintes, à la température et à la pression. .

6 Conclusion

Expérimentalement à température ambiante, les modules d'élasticité des deux variétés étudiés sont compris entre 4 et 4,5 MPa, ceci justifie le comportement viscoélastique de la pomme de terre.

Les résultats ont précisés les méthodes utiles pour étudier le comportement rhéologique du tissu de pomme de terre crue par simulation numérique telle que l'effet des charges sur l'échantillon. Il a été montré qu'en modifiant les paramètres du modèle de fluage mécanique (modèle de Berger) il devient possible d'assurer une bonne maîtrise des propriétés recherchées en se basant sur les résultats et sur les calculs des propriétés de fluage.

On peut conclure que sous une charge constante de 20N et une température de 46°C, η_1 peut atteindre la valeur de 8,69 E+04 MPa.s⁻¹ et η_2 la valeur de 3,76E+03 MPa.s⁻¹. Dans ces mêmes conditions, les valeurs de viscosité et de module d'Young sont inversement proportionnelles.

Les valeurs de complaisance instantanée ($j(t) = \frac{\epsilon(t)}{60}$) où (J_0) est supérieure à celle de complaisance retardée (J_r). En effet, le J_0 représente le composant élastique, tandis que le J_r est une combinaison de composant visqueux et élastique.

Chapitre 4 : DETERMINATION DES FORCES NECESSAIRES POUR DISLOQUER LES POMMES DE TERRE DE L'ARGILE

1 INTRODUCTION

Les pommes de terre "nouvelles" doivent être récoltées très soigneusement pour éviter d'endommager le produit par cassage ou encore par tamisage. Ces dernières sont extrêmement délicates et il faut les manipuler très doucement pour éviter d'endommager la peau.

Dans ce chapitre, nous étudions la distance entre les lignes de la plante, principalement l'effort capable de séparer l'argile de la pomme de terre selon deux critères principaux : le type de la variété et la quantité d'eau dans le sol afin de bien concevoir les nouveaux équipements en prenant soin de ne pas endommager notre produit.

2 L'IMPORTANCE DE CULTIVER LES POMMES DE TERRE

La pomme de terre occupe une place importante parmi les cultures vivrières dans de nombreux pays du monde et en termes de valeur nutritionnelle, compte tenu notamment de l'augmentation de la population et des nouvelles maladies qui nous obligent à lutter contre la famine grâce à de bonnes solutions. La pomme de terre est la première alternative à les cultures céréalières pour résoudre le problème alimentaire dans le monde notamment en Tunisie (Itaief et al, 2020; Rao, 2020 ; Amel et al, 2015; Scot et al, 2000). La culture de la pomme de terre est une importante activité sur le marché, occupant une grande superficie de terres dans le nord et le centre du pays, conduisant à une productivité élevée qui a un impact direct sur l'économie et le marché. La phase de récolte est l'étape la plus importante du cycle de production de notre produit (Kostenko et al, 2020 ; Kuzmin et al, 2013; He et al, 2012; Beukema and van der Zaag, 1990; Pasaman et Zakharchuk, 2012).

Grâce à une mécanisation bien étudiée à ce stade la relation entre les dommages causés à la pomme de terre, le criblage et l'optimisation énergétique, reste également l'un des défis de la recherche fondamentale pour déterminer les bons paramètres de récolte. Nous examinons donc les effets de la teneur en eau sur le sol et ses relations avec la force vibratoire provoquée par le tamis, pour atteindre une valeur capable de séparer les pommes de terre du sol, cette énergie doit être calculée en tenant compte de tous les paramètres (Molema, 1999 ; Bottega, 2014; Abbasov, 2018 ; Wang et al, 2018).

3 ÉVALUATION ET ETAPES DE PRODUCTION

3.1 Séparation de la pomme de terre de l'argile

La récolte est l'étape la plus importante dans l'ensemble de la mécanisation de la production de pommes de terre, le problème le plus difficile dans ce processus est la séparation minutieuse des pommes de terre, du sol et des impuretés, et en attendant pour contrôler le taux de dommages et le taux des chocs. Habituellement, les pommes de terre doivent être récoltées en peu de temps. Afin d'améliorer les performances de séparation de la pomme de terre du sol et d'obtenir de meilleures performances, la plupart des recherches se sont concentrées sur l'agitation et la disposition du séparateur. En termes de contrôle des ecchymoses et des dommages lors de la récolte des pommes de terre, l'efficacité et la qualité de la récolte peuvent souvent être améliorées en développant de nouveaux types de séparateurs de pommes de terre, en régulant les paramètres de ce dernier pour le processus de récolte. En contrôlant la proportion de sol mélangé avec de la terre et en améliorant la coupe. Afin de répondre à la demande de conditions de récolte du sol difficiles, il est nécessaire de trouver la relation de la dégradation de la pomme de terre sur le coefficient de la hauteur en prenant en compte de l'effet du contact avec le matériau, la teneur en humidité et l'identification des principaux facteurs affectant l'endommagement de la pomme de terre.

En raison de la grande quantité de mélange de pommes de terre et son fort caractère aléatoire, les performances de séparation et la qualité de la récolte peuvent être facilement affectées par de multiples facteurs liés aux machines agricoles, il est donc difficile d'obtenir une séparation à haute efficacité et récolte à faible perte.

Les pommes de terre sont généralement tamisées plusieurs fois au cours de leur cycle de séparation, ce qui entraîne des cassures et un taux élevé de rupture des détériorations et des chocs pouvant se produire, entraînant des pertes économiques importantes pour les producteurs.

3.2 Profondeur de plantation

La profondeur exacte de plantation des pommes de terre de semence est d'une grande importance. Les produits végétaux doivent contenir un minimum de tubercules verts et la résistance mécanique du sol ne doit pas retarder l'émergence et le développement des plantes. La caractéristique de croissance unique de chaque groupe nécessite des ajustements dans les techniques de gestion pour réduire le verdissement des tubercules de plein champ sans réduire le rendement, et la profondeur de plantation qui affecte le niveau des tubercules. Bien que des informations sur la profondeur de plantation soient disponibles dans différentes parties du

monde, cet aspect a reçu beaucoup d'attention de la part des travailleurs de la pomme de terre, il existe trois options pour placer les pommes de terre dans le sol selon différentes profondeurs de plantation :

Petit - pas plus de 6 cm ; Cette méthode est utilisée lorsque les tubercules sont encore dans le sol froid ou que le sol appartient à un groupe lourd et limoneux difficile à vaincre par la pousse.

Central - de 6 à 10 cm ; Idéal pour les zones à sols sableux.

Profondeur - 12 cm ou plus ; Il est bien adapté pour les sols de haute qualité à haute fertilité, ainsi que pour les zones sans humidité naturelle.

Les agriculteurs pratiquent souvent une culture moyenne et profonde de la pomme de terre. Ceci s'explique par le relâchement suffisant du sol (les pousses trouveront facilement leur chemin), et le réchauffement précoce du sol.

La profondeur d'enrobage est déterminée par la taille des tubercules. S'il est petit (moins de 50 g), il doit être placé un peu plus haut.

Si on place de l'engrais au moment de la plantation, il faut s'assurer qu'il est placé à 10 cm du tubercule pour éviter sa brûlure. Les engrais peuvent être réduits de 20% s'ils sont placés dans la rangée.

3.3 Distance de plantation

Afin d'améliorer le rendement des machines agricoles, l'écartement recommandé des rangs de pommes de terre en cas de plantation est d'environ 80cm. La distance entre les plantes d'une rangée dépend de la taille de la variété des graines et de la destination de la récolte.

Cependant, un espace suffisant doit être laissé entre les lignes dans les champs production de pommes de terre (généralement 25-30 cm) (Figure 50) (Stark et al, 2020).



Figure : 49 Etapes de croissance de la pomme de terre - processus de plantation - diagrammes du cycle de vie des plantes (Duncan et al, 1999).

Certaines variétés de tubercules lorsqu'elles sont plantées ont un espacement spécial. En maintenant les bonnes distances de plantation, le rendement de ses cultures s'améliore et offre un bon couvert végétal qui protège le sol de l'érosion par aspect herbeux.

3.4 Le défanage des pommes de terre

Le but du défanage des pommes de terre est de réduire l'interaction biologique des tubercules avec leurs tiges pour faciliter la récolte. Il limite également l'infection causée par le mildiou, pour limiter la propagation des maladies virales transmises par les pucerons, et comme objectif clair de limiter la taille du tubercule et d'aider à la formation de la peau. Ce processus est généralement appliqué au moins quatorze jours avant la récolte ou l'arrivée de tout tubercule de la taille requise. Généralement, cette opération s'effectue mécaniquement, quand c'est nécessaire le séchage peut être effectué chimiquement ou thermiquement. Pour faciliter la récolte, le désherbage doit être fait deux semaines avant l'arrachement des tubercules (mécanique, chimique, thermique Figure 51). Un travail considérable est envisagé afin de réduire les endommagements au produit dans le processus.



Figure : 50 Le défanage des pommes de terre
(a : mécanique, b : thermique, c : chimique)

4 LA RECOLTE

Le stade de la récolte est aussi important pour la commercialisation de la pomme de terre que le stade de la production végétale. Souvent le producteur propose un produit qui répond aux normes de qualité exigées par les consommateurs. Il augmente considérablement les coûts de production et de tri pour répondre aux exigences des transformateurs et des clients.

Il peut être perdu chaque année en raison de dommages mécaniques excessifs aux tubercules pendant la récolte et le stockage. Cette dernière étape nécessite donc une gestion rigoureuse des processus et une sensibilisation à la fragilité des tubercules (Peters 1996).

Trois types de blessures peuvent survenir lors de ces opérations : Rides internes, déchirures, taches brunes, impacts superficielles. Les pommes de terre se détériorent généralement rapidement, tandis que parfois des endommagements profonds apparaissent, ce qui affecte grandement la qualité du tubercule. Les taches brunes internes ne sont pas visibles pendant le stockage (Hesen, 1960).

C'est le résultat des coups auxquels les tubercules ont été soumis au cours des différentes étapes de la récolte. Chacune de ces infections est une porte d'entrée vers des organismes pathogènes : risque accru de contamination des cultures et qualité de production réduite.

4.1 Matériels et méthodes

4.1.1 Formulation théorique de problème

Un modèle simple pour modéliser les systèmes de criblage ou autrement appelé moyen de séparer la pomme de terre du sol (Figure 52). Un Systèmes linéaire forcés à un degré de liberté, car l'amortissement des oscillations était dû à une diminution de l'énergie mécanique sous forme de chaleur dissipée. Pour compenser ces pertes d'énergie et entretenir (maintenir) les oscillations, une source d'énergie par une force extérieure est nécessaire. On va donc ajouter une force externe souvent appelée excitation.

La force d'excitation sinusoïdale d'un moteur agissant vers la partie supérieure direction du tamis rectangulaire (F) est la force exercée par le système de tamisage.

Elle se traduit par une force vibratoire, également les forces des ressorts de support agissant sur le bas de l'écran rectangulaire (N), amortissant les efforts dus au frottement de surface de mouvement (F1), et la composante de la force gravitationnelle du tamis rectangulaire qui comprend le tubercule et le sol au-dessus (poids: p) du système sera soumis à une vibration d'une fréquence donnée (w: pulsation d'excitation) imposée par la force sinusoïdale. La fréquence des oscillations de la masse m après un certain temps transitoire sera transformée en une force excitatrice (Haddad and Momani, 2014 ;Michalczyk and Cieplak, 2016 ; Li et al, 2018 ; Liu et al, 2019 ; Xin and Liang, 2019).

L'amplitude de ces oscillations est une solution de l'équation Lagrange qui a la forme suivante :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = \frac{\partial D}{\partial \dot{x}} + F \quad (82)$$

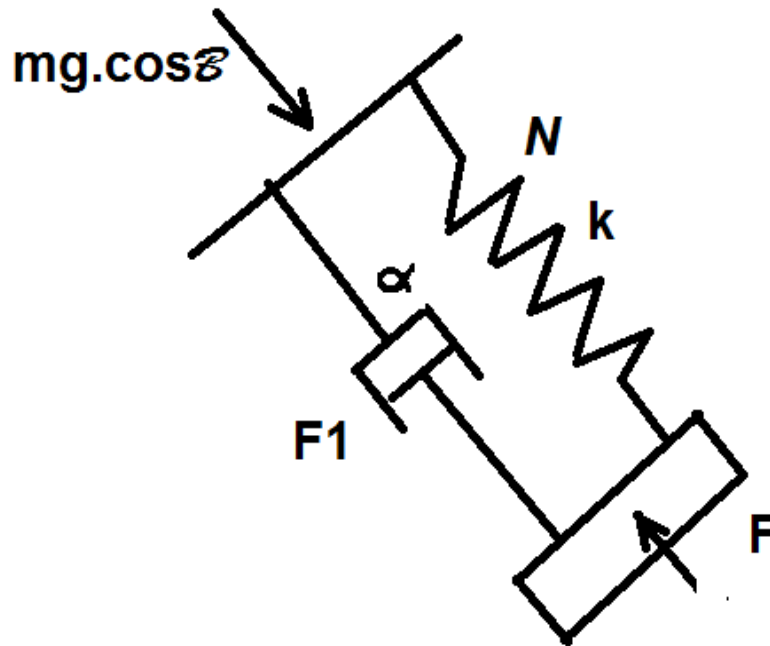


Figure : 51 Modélisation du système de criblage

F la force appliquée directement aux charges

$$L = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 - \frac{1}{2}kx^2, q = \frac{1}{2}\alpha\dot{x}^2, F = F_0\cos(\omega t) \quad (83)$$

4.1.2 Validation des paramètres mécaniques d'éprouvette

Pour réussir à déterminer des résultats significatifs et exploitables des propriétés mécaniques et rhéologiques des pommes de terre afin d'alimenter un modèle par éléments finis, il est nécessaire de réaliser des essais expérimentaux de traction et de compression dans les mêmes conditions d'éprouvette (pomme de terre) et avec le même banc d'essai. Des tubercules de variétés Spunta ont été pris et mis entre 7 et 46 °C pendant 24 heures jusqu'à homogénéisation des gradients de températures comme le montre les Figures ci-dessous. Pour identifier les forces de dislocation, il est obligatoire de chercher les propriétés mécaniques telles que le module d'Young et le coefficient de Poisson (qui sera déterminé en fonction des proportions d'humidité). Toutes ces valeurs serviront des conditions aux limites pour les modèles numériques.

Les résultats des propriétés mécaniques (essai de traction) du matériau de l'éprouvette sont indiqués dans le tableau 14.

Tableau 14 Comportement mécaniques des éprouvettes étudiées

T	T=7°C	T=25°C	T=46°C
Variété :Spunta	t=24 h		
μ	0,46	0,39	0,32
E (MPa)	3,2	3,8	4,2
Résultats expérimentaux			
K=°C+273,15 °C=0,55(°F-32)			

4.2 Résultats et discussion

4.2.1 Résultats

Nous avons choisi six masses de la plus petite disponible à la plus grande. Pour les deux variétés nous avons fixé des profondeurs similaires aux conditions de criblage, après chaque test de séparation des deux spécimens nous prenons les échantillons de sol pour déterminer la quantité d'eau présente (tableau 15) par relation (9.4) (shweikani et al, 1995 ; O'kelly, 2005) ainsi que le poids de la pomme de terre et les volumes pour en extraire les indicateurs maximaux sur cette dernière, Spunta (tableau16) Daifla (tableau 17).

Tableau : 15 Variation de la teneur en eau du sol

	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure4	Mesure 5
Boîte vide m0 (en kg)	0,0299	0,031	0,03	0,0299	0,0298
Masse échantillon sec + boîte (m1) (en kg)	0,1876	0,1692	0,2039	0,3429	0,3272
Masse échantillon humide + boîte (m2) (en kg)	0,1839	0,148	0,1738	0,2833	0,2641
% teneur en eau du sol (% s w c)	2,34622701	15,3400868	17,3087982	19,0415335	21,2172159

La quantité d'eau dans le sol est déterminée par l'équation (9.4)

$$\%swc = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} * 100 \quad (84)$$

Tableau 16 Masse volumique apparente (Spunta)

Variété: Spunta		V (m ³)	ρ=w/v (kg.m ⁻³)
Poids (kg)			
W1	0,0636	0,0000655	970,992366
W2	0,1239	0,000126	983,333333
W2	0,3237	0,0003325	973,533835
W4	0,3987	0,0004155	959,566787
W5	0,4739	0,000502	944,023904
W6	0,6981	0,0007385	945,294516

Tableau : 17 Détermination des propriétés, de la masse volumique apparente(Daifla)

Variété :Daifla	Poids (kg)	V (m ³)	ρ =w/v (kg.m ⁻³)
Poids (kg)			
W1	0,078	0,0007215	108,108108
W2	0,1158	0,0001125	1029,33333
W3	0,2022	0,0001985	1018,6398
W4	0,3929	0,0003874	1014,19721
W5	0,512	0,000501	1022,36
W6	0,685	0,0006635	1032,698

La densité apparente est déterminée directement par lecture directe de la masse et du volume après calcul de la différence de niveau d'eau de chaque pièce à 25 ° C (en supposant que le transfert de masse entre la pomme de terre et l'eau n'existe pas). Les résultats obtenus ont une différence qui peut s'expliquer par la différence de composition tuberculeuse qui aboutit à

l'équation (10.4), la densité réelle (ρ_r) calculée à partir de la pondération des densités de ses constituants est donnée par :

(Krokida et al, 2000 ;Al-muhtaseb et al, 2004 ;Boukouvalas et al, 2006,Sahin et Sumnu 2006).

$$\rho_r = \sum_{k=1}^n X_k^v \rho_k = \frac{1}{\left(\sum_{k=1}^n \frac{X_k^w}{\rho_k} \right)} \quad (85)$$

Avec

ρ_k =densité du $i^{\text{ème}}$ composant (kg.m^{-3}),

X_k^v = fraction volumique du $i^{\text{ème}}$ composant,

X_k^w = fraction massique du $i^{\text{ème}}$ composant,

n = nombre de composants.

Ces mesures ainsi que les formes influenceront les tendances des courbes par la suite.

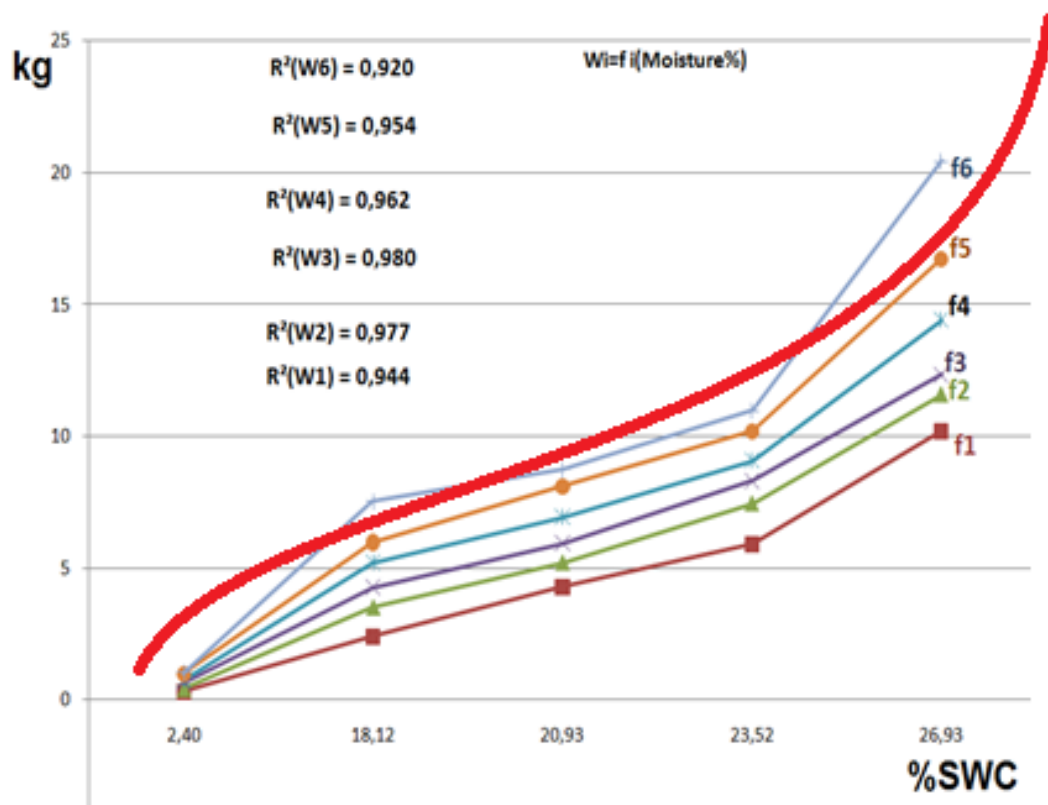


Figure 52 Evolution de la charge en fonction du % de la teneur en eau dans le sol (Spunta) (%SWC)

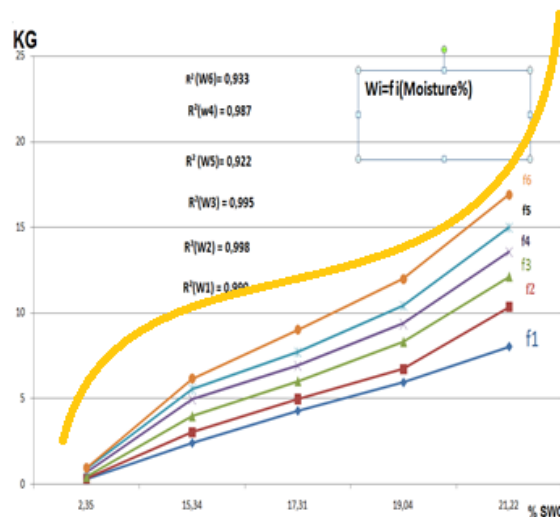


Figure 53 Evolution de la charge en fonction du % de la teneur en eau dans le sol (Daifla) (%SWC)

Les courbes des charges en fonction de teneur d'eau ci-dessus pour l'extraction de la pomme de terre de sol, présente trois zones significatives :

- * la première montre la facilité du processus de séparation lorsque la quantité d'eau est faible.
- * la deuxième présente une zone plus linéaire,
- * la troisième présente la hausse importante d'énergie

Progressivement la courbe prend la direction verticale, c'est-à-dire que nous approchons d'une valeur infinie.

Les forces nécessaires pour extraire la variété Spunta (qui a une forme plus allongée) plus importante que celle de la Daifla (similaire à la sphère) par rapport à la même masse s'explique par la géométrie et la densité des deux cultivars.

On cherche donc à rendre les courbes plus lisibles par une interpolation lagrangienne à travers l'extraction des paramètres liés :

le poids (force) en kg et la teneur en eau ; $w_i = f(qw)$, ($i = \text{Spunta, Daifla}$ et $qw = \% \text{ teneur en eau du sol}$).

Par une fonction simple et facile par modélisation en déterminant les coefficients polynomiaux. Pour cela, nous devons calculer les différences divisées pour chaque courbe qui indique nécessairement le poids et le type de variété (Spunta w_i : 1..6, delawi: 1 ... 6) dans les tableaux suivants (18.19.20.21).

Dans les deux cas nous essayons de ne remplir que la cinquième et la sixième mesure où la phase d'extraction devient de plus en plus difficile, puis elles sont remplacées à chaque fois par

les constantes prises de l'expérience et tirer enfin l'amplitude F_0 ($F_0 = 100$ dan à l'ordre de 30% QW pour un coefficient de sécurité s).

On peut donc, à travers cette résistance du sol, déterminer les paramètres mécaniques nécessaires, en résumé nous donnons le modèle empirique de cette relation (Akinbamowo et al, 2011).

Tableau : 18 Calcul des différences divisées pour Spunta W5

SpuntaW5		QW	δ^1 QW	δ^2 QW	δ^3 QW	δ^4 QW
0	0,99866667	A0=2,4025974				
			A1=3,14823944			
1	5,991	18,1196581		A2=-0,25527367		
			1,33682597		A3=0,02467529	
2	8,09463333	20,9318498		-0,0278004		A4=0,00187904
			1,21933221		-0,00490639	
3	10,2173333	23,5201263		-0,08054738		
			0,52283631			
4	16,7416667	26,9312847				

Tableau: 19 Calcul des différences divisées pour Spunta W6

SpuntaW6		QW	δ^1 QW	δ^2 QW	δ^3 QW	δ^4 QW
0	1,03966667	A0=2,4025974				
			A1=2,4170673			
1	7,5422	18,1196581		A2=-0,01249547		
			2,32067311		A3=-0,03264122	
2	8,754	20,9318498		-0,33717768		A4=0,00275189
			1,15927582		0,02081148	
3	10,9866667	23,5201263		-0,06826284		
			0,35994074			
4	20,4636667	26,9312847				

Tableau : 20 Calcul des différences divisées pour la Daifla W5

Daifla W5		QW	δ^1QW	δ^2QW	δ^3QW	δ^4QW
0	0,85733333	A0=2,34622701				
			A1= 2,76661316			
1	5,554	15,3400868		A2=- 0,26976049		
			0,92630709		A3= 0,021887905	
2	7,67933333	17,3087982		-0,06044646		A4=- 0,00125525
			0,63215446		0,004160411	
3	10,4203333	19,0415335		-0,02123043		
			0,4771582			
4	14,98	21,2172159				

Tableau : 21 Calcul des différences divisées pour Daifla W6

Daifla W6		QW	δ^1QW	δ^2QW	δ^3QW	δ^4QW
0	0,93933333	A0=2,34622701				
			A1=2,48607012			
1	6,166	15,3400868		A2=-0,2222418		
			0,6944308		A3=0,018424044	
2	9,001	17,3087982		-0,01904301		A4=-0,00114869
			0,58393689		9,02206E-05	
3	11,9683333	19,0415335		-0,01807459		
			0,44116573			
4	16,9	21,2172159				

Donc l'équation de l'évolution de la charge en fonction de la quantité d'eau dans le sol est de la forme suivante :

$$p(w_{5ou 6}) = 0 + A1(W - W6-0 +) + A2(W - W6 -0)(W - W6 -1) + A3(W -W6 -0)(W - W6-1)(W - W6 -2) + A4(W - W6 -0)(W - W6-1)(W - W6 -2)(W - W6-3) \quad (86)$$

$$p(w) = B0 + B1 * W + B2 * W^2 + B3 * W^3 + B4 * W^4 + .. + Bn * W^n \quad (87)$$

Forme générale

$$p(QW) = \sum_{i=0} W_{i(spunta,defla)} L_i(QW) \quad (88)$$

Avec L_i polynome de Lagrange
$$L_i(QW) = \prod_{\substack{j \\ i \neq j}} \frac{QW * QW_j}{QW_i - QW_j}$$

B_i, A_i : constante donnée par la méthode de la différence finie.

W_i, W_j : La charge requise pour la segmentation à chaque étape

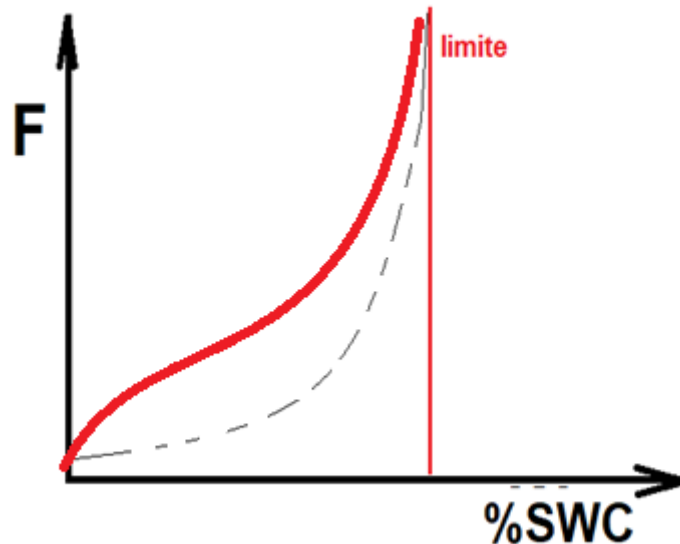


Figure : 54 Evolution de la charge en fonction du % de la teneur en eau du sol (Daifla) (%SWC)

Ces fonctions polymériques conclues par interpolation, ont un point (Swc) où leur limite tend vers l'infini (asymptote verticale), on peut traduire cela mécaniquement par la limite d'énergie du système de criblage capable de séparer la pomme de terre de l'argile. Cette propriété importante est capable de réduire la détérioration du matériel agricole en cas de précipitation.

4.3 Interprétation :

L'analyse des données expérimentales décrites dans les valeurs trouvées donne une conclusion que lors de la séparation des tubercules interagissent avec les outils de travail actifs et aussi le type de sol, la quantité d'humidité, dans ce dernier, joue un rôle capital.

Les tubercules tombent lors du passage de la section vibrante sur les rails de l'élévateur, ainsi que lors du passage d'un élévateur à un autre, entraînant une quantité limitée détruite, il faut donc faire une interprétation de ces données.

Le taux d'impact des dommages aux tubercules tombés doit être bien étudié et acceptable pour les tubercules. En conséquence, le problème est bien résolu. La bonne qualité du processus de récolte des pommes de terre nécessite des études théoriques et expérimentales visant à améliorer la conception et le fonctionnement des outils de séparation des arracheuses de pommes de terre.

5 Conclusion :

Les résultats des expériences observés, peuvent être traduits en points finaux, il y a une valeur d'humidité limite pour que la pomme de terre ne puisse pas être séparée du sol, et la forme de la variété joue également un rôle important, celui d'assurer le bon fonctionnement des mécanismes et pour éviter les surcharges qui peuvent conduire à des pannes de formes diverses, mais aussi pour améliorer la qualité, optimiser l'énergie et bien sûr le temps de récolte. Il réduit également la quantité de pommes de terre endommagées lorsque le travail est effectué dans les meilleures conditions, ce qui améliore finalement la rentabilité à ce stade du produit agricole. Enfin le paramètre le plus important enregistré à la suite de ces expérimentations effectuées est que si l'humidité dépasse 30%, il devient impossible de récolter la pomme de terre ; il est à noter que ces valeurs sont utiles pour le nord de la Tunisie (Mejez El-Bab).

CONCLUSION GENERALE

De nombreuses recherches visent à déterminer les caractéristiques thermiques et mécaniques des produits agricoles, d'autant plus qu'il y a des spécifications et des complications. Les lois classiques donnent des résultats approximatifs de sorte que les expérimentations et les comparaisons avec les modèles empiriques deviennent de plus en plus obligatoires. Il est nécessaire d'aller plus loin en concevant des bancs d'essai et en validant par des modèles numériques. La pomme de terre, au cours de son cycle de vie, est sollicitée en fonction du temps par des forces statiques, rhéologique et des chocs. Plusieurs paramètres permettant de modéliser son comportement et ses réponses dans différentes conditions thermiques.

Dans cette étude, certains aspects physiques et mécaniques de deux types de pommes de terre (Spunta, Daifla) sont étudiés.

Les résultats de l'étude ont montré que selon la taille des tubercules il y a une grande différence entre la masse volumique réelle (pour Daifla $665,56 \text{ kg.m}^{-3}$, Spounta de $798,98 \text{ kg.m}^{-3}$) et la masse volumique apparente (Daifla $1018,18 \text{ kg.m}^{-3}$, Spunta $997,89 \text{ kg.m}^{-3}$).

Ces paramètres seront utiles pour déterminer la porosité (P environ 31 jusqu'à 35 %), afin d'assurer le transport et réussir l'écoulement d'air de refroidissement principalement en cas de stockage. Ces mesures ont également un effet significatif sur les surfaces de frottement des tubercules de pomme de terre.

Une étude fondamentale a été faite pour déterminer les conductivités thermiques, les résultats expérimentaux montrent qu'il existe une plage de valeur où k est comprise entre (0,31 à 0,59 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Par une étude numérique, un flux thermique imposé de 15 minutes sur un tubercule de taille moyenne, provoque une homogénéisation de chaleur.

La variation des résultats trouvés, s'explique par la différence de géométrie des tubercules. Par comparaison avec la littérature, les valeurs trouvées sont acceptables par référence aux autres produits ayant la même morphologie. Il existe plusieurs méthodes expérimentales de vérification mais la limitation du matériel présente malheureusement une contrainte réelle.

Les essais de traction et de compression réalisés à différentes températures ont permis de déterminer l'évolution du comportement mécanique de la pomme de terre, ce qui serait bénéfique pour éviter des dommages au stockage. Les résultats trouvés pour le module d'Yong entre 4,5 MPa à 3 MPa et le coefficient de Poisson entre 0,32 à 0,45. Ces valeurs seront utiles pour vérifier le comportement viscoélastique de ce produit agricole, ou forcément la viscosité qui dépend de la température. Par modélisation numérique on a défini la viscosité dynamique : η_1 , η_2 à 7, 25 et 45°C. Ce choix est fait en fonction du cycle de vie des pommes de terre crues.

La récolte des pommes de terre par des machines agricoles nécessite à chercher la force mécanique capable d'extraire un tubercule de l'argile selon plusieurs paramètres tout en prenant en compte la force de tamisage et la quantité d'eau dans le sol (à partir d'une moyenne de 30% d'humidité de sol il, devient difficile pour le type d'argile étudié, (Mjez El Bab)).

Les résultats des travaux ouvrent plusieurs pistes de recherche qui seront utiles pour modéliser ce matériau dans plusieurs autres formes (stockage, chips...) et aussi pour les produits agricoles similaires d'un point de vue mécanique.

Le but ultime est de simuler le processus rhéologique depuis la modélisation de la pomme de terre par prédiction des états mécaniques et structurelle, d'autant plus que la pomme de terre nécessite du temps pour être préservé dans des conditions appropriées.

Références Bibliographiques :

- 1 *Abbasov, G. I. (2018). Evaluation Of The Process Of Separation Of Soil From Potato Harvester. International Academy Journal. Web Of Scholar, 7, 25.*
- 2 *Adane, H., Miranda, Pmm., Agajie, T., Willemien, J.M.L, Alfons, O.L., Admasu, T. And Paul, C.S. (2010). Analysis Of Seed Potato Systems In Ethiopia. Amer. J. Potato Res. 87(6): 537-552.*
- 3 *Ahangarnezhad, N., Najafi, G., And Jahanbakhshi, A. (2019). Determination Of The Physical And Mechanical Properties Of A Potato (The Agria Variety) In Order To Mechanise The Harvesting And Post-Harvesting Operations. Research In Agricultural Engineering, 65(2), 33-39.*
- 4 *Akinbamowo, R. O., Ogunlowo, A. S., AndAgbetoye, L. A. S. (2011). Development Of A Tractor-Mounted Cocoyam (Xanthosoma Spp.) Harvester. Australian Journal Of Agricultural Engineering, 2(3), 82.*
- 5 *Albaloushi, N. S (2012). Rheological Behavior Of Tomato Fruits Affected By Various Loads Under Storage Conditions. American Journal Of Engineering Research, 2(3), 36-43.*
- 6 *Al-Muhtaseb, A. H., Mcminn, W. A. M., And Magee, T. R. (2004, August). Shrinkage, Density And Porosity Variations During The Convective Drying Of Potato Starch Gel. In 14th International Drying Symposium (Ids), São Paulo, Brazil (Vol. 100, Pp. 1604-1611).*
- 7 *Álvarez, M. D., Canet, W., Cuesta, F And Lamua, M. (1998). Viscoelastic Characterization Of Solid Foods From Creep Compliance Data: Application To Potato Tissues. ZeitschriftFürLebensmitteluntersuchung Und-Forschung A, 207(5), 356-362.*
- 8 *Amel, M. B., Hiba, G., Boutheina, M. H. D., AndAbdehamid, B. (2015). Water Use Efficiency Of Potato Crop Irrigated Under Tunisian Climatic Condition. Sci. Agri, 11(1), 38-41.*
- 9 *Ansari, F. A. (1999). Finite Difference Solution Of Heat And Mass Transfer Problems Related To Precooling Of Food. Energy Conversion And Management, 40(8), 795-802.*
- 10 *Arvy, M. P., And Gallouin, F. (2015). Légumes D'hier Et D'aujourd'hui. Humensis.*
- 11 *Barbosa-Cánovas, G. V. (Ed.). (2009). Food Engineering-Volume I. Eolss Publications.*
- 12 *Barbosa-Cánovas, G. V. (Ed.). (2009). Food Engineering-Volume I. Eolss Publications.*
- 13 *Beals, K. A. (2019). Potatoes, Nutrition And Health. American Journal Of Potato Research, 96(2), 102-110.*
- 14 *Beukema, H. P., And Van Der Zaag, D. E. (1990). Introduction To Potato Production (No. 633.491 B4). Wageningen: Pudoc.*
- 15 *Blom-Zandstra, G., Soethoudt, H.,AndAxmann, H. (2018). Value Chain Analysis Of The Potato Sector In Tunisia: Business Opportunities (No. Wpr-804). Wageningen Plant Research, Business Unit Agrosystems Research*
- 16 *Bottega, W. J. (2014). Engineering Vibrations. Crc Press.*
- 17 *Boukouvalas, C. J., Krokida, M. K., Maroulis, Z. B., AndMarinos-Kouris, D. (2006). Density And Porosity: Literature Data Compilation For Foodstuffs. International Journal Of Food Properties, 9(4), 715-746.*
- 18 *Bourne, M. (2002). Food Texture And Viscosity: Concept And Measurement. Elsevier.*
- 19 *Bourne, M. C (1982). Texture, Viscosity And Food. Food Texture And Viscosity, 1-23.*

- 20 Brahim, T., Dhaou, M. H. And Jemni, A. (2014). *Theoretical And Experimental Investigation Of Plate Screen Mesh Heat Pipe Solar Collector. Energy Conversion And Management*, 87, 428-438
- 21 Budžaki, S., & Šeruga, B. (2014). *Specific Heat Of Strawberry And Raspberry Puree. Journal Of Food Processing And Preservation*, 38(6), 2240-2245.
- 22 Caglayan, N., Oral, O., Celik, H. K., Cinar, R., Rodrigues, L. C. D. A., Rennie, A. E., And Akinçi, I. (2018). *Determination Of Time Dependent Stress Distribution On A Potato Tuber During Drop Case. Journal Of Food Process Engineering*, 41(7), E12869.
- 23 Califano, A. N., And Calvelo, A. (1991). *Thermal Conductivity Of Potato Between 50 And 100° C. Journal Of Food Science*, 56(2), 586-587.
- 24 Campbell, S.E. Prussia, And R.L. Shewfelt (20) *Evaluation Of Postharvest Injury To Fresh Market Tomatoes, J. Food Distrib. Res.* 17(2):16,
- 25 Canet W, Alvarez Md, And Gil Mj (2007) *The Effect Of Test Conditions On Failure Parameters During Uniaxial Compression Of Potato Tissue. International Jour- Nal Of Food Science And Technology* 42, 728-738
- 26 Canet, W., Fernández, C And Alvarez, M. D. (2009). *Some Objective Instrumental Methods For Evaluating The Texture Of Solid Potato Tissue (Solanum Tuberosum L.). Potato Iii. Food 3 (Special Issue 1), 1-12.*
- 27 Canet, W., Fernández, C And Alvarez, M. D. (2009). *Some Objective Instrumental Methods For Evaluating The Texture Of Solid Potato Tissue (Solanum Tuberosum L.). Potato Iii. Food 3 (Special Issue 1), 1-12.*
- 28 Challob, S., Resan, K And Ibrahim, Y. (2015). *Stress Relaxation And Creep Effect On Polypropylene Below Knee Prosthetic Socket. Journal Of The Japanese Society For Experimental Mechanics*, 15(Special_Issue), S93-S98.
- 29 Chebbi, H. E., Pellissier, J. P., Khechimi, W., And Rolland, J. P. (2019). *Rapport De Synthèse Sur L'agriculture En Tunisie (Doctoral Dissertation, Ciheam-Iamm).*
- 30 Chen P, Whitney Lf, And Peleg M (1994) *Some Tensile Characteristics Of Bread Crumb. Journal Of Texture Studies* 25, 299-310
- 31 Chen, C. S. (1985). *Thermodynamic Analysis Of The Freezing And Thawing Of Foods: Ice Content And Mollier Diagram. Journal Of Food Science*, 50(4), 1163-1166.
- 32 Chen, J., and Stokes, J. R. (2012). *Rheology And Tribology: Two Distinctive Regimes Of Food Texture Sensation. Trends In Food Science & Technology*, 25(1), 4-12.
- 33 Chu, C. F., And Peleg, M. (1985). *The Compressive Behavior Of Solid Food Specimens With Small Height To Diameter Ratios 2. Journal Of Texture Studies*, 16(4), 451-464.
- 34 Civille, G. V. (2011). *Food Texture: Pleasure And Pain. Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 59(5), 1487-1490.
- 35 Costell, E. and Duran, L. (2002). *Food Texture: Sensory Evaluation. Food Engineering – Vol. Ii*
- 36 Dey, A And Basudhar, P. K. (2010). *Applicability Of Burger Model In Predicting The Response Of Viscoelastic Soil Beds. Geoflorida 2010: Advances In Analysis, Modeling & Design*, 2611-2620.
- 37 Dey, A And Basudhar, P. K. (2010). *Applicability Of Burger Model In Predicting The Response Of Viscoelastic Soil Beds. Geoflorida 2010: Advances In Analysis, Modeling & Design*, 2611-2620.
- 38 Dogan, M., Kayacier, A., Toker, Ö. S., Yilmaz, M. T And Karaman, S. (2013). *Steady, Dynamic, Creep, And Recovery Analysis Of Ice Cream Mixes Added With Different Concentrations Of Xanthan Gum. Food And Bioprocess Technology*, 6(6), 1420-1433.

- 39 Dogan, M., Kayacier, A., Toker, Ö. S., Yilmaz, M. T AndKaraman, S. (2013). *Steady, Dynamic, Creep, And Recovery Analysis Of Ice Cream Mixes Added With Different Concentrations Of Xanthan Gum. Food And Bioprocess Technology*, 6(6), 1420-1433.
- 40 Duncan, D. R., Hammond, D., Zalewski, J., Cudnohufsky, J., Kaniewski, W., Thornton, M. And Feldman-Riebe, J. (1999). *633 Field Performance Of “Transgenic” Potato, With Resistance To Colorado Potato Beetle And Viruses. Hortscience*, 34(3), 556e-557.
- 41 El-Maksoud, A., Gamea, G. R And Am, A. E. G. (2009). *Rheological Constants OfThe Four Elements Burgers Model For Potato Tubers Affected By Various Fixed Loads Under Different Storage Conditions. Misr Journal Of Agricultural Engineering*, 26(1), 359-384.
- 42 El-Maksoud, A., Gamea, G. R And Am, A. E. G. (2009). *Rheological Constants OfThe Four Elements Burgers Model For Potato Tubers Affected By Various Fixed Loads Under Different Storage Conditions. Misr Journal Of Agricultural Engineering*, 26(1), 359-384.
- 43 El-Raie, A.E.S., N.A. Hendawy And A.Z. Taib (1996) *Study Of Physical And Engineering Properties For Some Agricultural Product ,Misr J. Of Agric. Eng.*, 13 (1): 211-22
- 44 Eroglu, A., Bayrambaş, K., Eroglu, Z., Toker, O. S., Yilmaz, M. T., Karaman, S AndDogan, M (2016). *Steady, Dynamic, Creep/Recovery, And Textural Properties Of Yoghurt/Molasses Blends: Temperature Sweep Tests And Applicability Of Cox–Merz Rule. Food Science And Technology International*, 22(1), 31-46.
- 45 Ferziger, J. H., Perić, M., And Street, R. L. (2002). *Computational Methods For Fluid Dynamics (Vol. 3, Pp. 196-200). Berlin: Springer.*
- 46 Finney, E.E. And C.W. Hall, (1967). *Elastic Properties Of Potatoes. Transaction Of The Asae*, 10: 4-8.
- 47 Fonmboh, D. J., Achick, T. E., Ntungwen, F. C., And Divine, B. N. (2019). *Physical Characterization Of Two Wild Varieties Of Edible Orchid Tubers. Advances In Bioscience And Bioengineering*, 7(4), 72.
- 48 Forbes, G. A., Charkowski, A., Andrade-Piedra, J., Parker, M. L., And Schulte-Geldermann, E. (2020). *Potato Seed Systems. In The Potato Crop (Pp. 431-447). Springer, Cham.*
- 49 Fraser, B. M., Verma, S. S., And Muir, W. E. (1978). *Some Physical Properties Of Fababeans. Journal Of Agricultural Engineering Research*, 23(1), 53-57.
- 50 Fricke, B. A., And Becker, B. R. (2002). *Evaluation OfThermophysical Property Models For Foods. Ashrae Transactions*, 108(1), 261.
- 51 Fuglie, K. O. (1994). *The Demand For Potatoes In Tunisia: Are They A Cereal Substitute?. European Review Of Agricultural Economics*, 21(2), 277-286.
- 52 Gane, R. (1936). *The thermal conductivity of the tissue of fruits. Report of Director of Food Investigation*, 5, 211-212.
- 53 Ghabel, R., Rajabipour, A., Ghasemi-Varnamkhasti, M.,AndOveisi, M. (2010). *Modeling The Mass Of Iranian Export Onion (Allium Cepa L.) Varieties Using Some Physical Characteristics. Research In Agricultural Engineering*, 56(1), 33-40.
- 54 Haddad, J. S., And Momani, W. (2014). *A Comparison Of Two Theoretical Methods Of The Materials Transportation In The Vibrating Screen Machines And Improve The Significance Of Their Experimental Results. J. Mech. Civil Eng.(Iosr-Jmce)*, 11(4), 46-52
- 55 He, Z., Larkin, R., And Honeycutt, W. (Eds.). (2012). *Sustainable Potato Production: Global Case Studies. Springer Science & Business Media.*
- 56 Hesen, J. C. (1960). *Mechanical Damage To Potatoes Ii. European Potato Journal*, 3(3), 209-228.
- 57 Hetzroni, A., Vana, A.,AndMizrach, A. (2011). *Biomechanical Characteristics Of Tomato Fruit Peels. Postharvest Biology And Technology*, 59(1), 80-84.

- 58 Hirsch, C. N., Hirsch, C. D., Felcher, K., Coombs, J., Zarka, D., Van Deynze, A., And Buell, C. R. (2013). *Retrospective View Of North American Potato (Solanum Tuberosum L.) Breeding In The 20th And 21st Centuries*. *G3: Genes, Genomes, Genetics*, 3(6), 1003-1013.
- 59 Hlaoui, A., Mazzoni, E., Souissi, R., And Bouhachem, S. B. (2020). *Diversity And Abundance Of Landing Aphids In Two Areas Of Seed Pota-To Production In Tunisia; Relative To The Incidence Of Potato Viruses*. *Redia*, 103, 75-85.
- 60 Holman J.P (2010) ; *Heat Transfer, Tenth Edition Mcgraw-Hill, A Business Unit Of The Mcgraw-Hill Companies, Inc., 1221 Avenue Of The Americas, New York, Ny 10020*.
- 61 Huilgol, R. R. (1975). *On the concept of the Deborah number*. *Transactions of the Society of Rheology*, 19(2), 297-306.
- 62 Hussain, T. (2016). *Potatoes: Ensuring Food For The Future*. *Adv Plants Agric Res*, 3(6), 178-182.
- 63 Iso, *Sensory Analysis (1992) ,Vocabulary, Iso Standard 5492international Organization For Standardization, Geneva, Switzerland,*.
- 64 Jahromi, M. K., Rafiee, S., Jafari, A., Bousejin, M. G., Mirasheh, R., And Mohtasebi, S. S. (2008). *Some Physical Properties Of Date Fruit (Cv. Dairi)*. *International Agrophysics*, 22(3), 221-224.
- 65 Karunasena, H. C. P., And Senadeera, W. (2017). *Numerical Modeling Of Morphological Changes Of Food Plant Materials During Drying*. *Handbook Of Drying Of Vegetables And Vegetable Products*, 387.
- 66 Kheiralipour, K., Karimi, M., Tabatabaeefar, A., Naderi, M., Khoubakht, G., And Heidarbeigi, K. (2008). *Moisture-Depend Physical Properties Of Wheat (Triticum Aestivum L.)*. *Journal Of Agricultural Technology*, 4(1), 53-64.
- 67 Khodabakhshian, R., And Emadi, B. (2011). *Determination Of The Modulus Of Elasticity In Agricultural Seeds On The Basis Of Elasticity Theory*. *Middle-East Journal Of Scientific Research*, 7(3), 367-373.
- 68 Khoshnam, F., Tabatabaeefar, A., Varnamkhasti, M. G., And Borghei, A. (2007). *Mass Modeling Of Pomegranate (Punica Granatum L.) Fruit With Some Physical Characteristics*. *Scientia Horticulturae*, 114(1), 21-26.
- 69 Khurana, S. P., Minhas, J. S., And Pandey, S. K. (2003). *The Potato: Production And Utilization In Sub-Tropics*.
- 70 Kinsella, J. E. (1987). *Physical Properties Of Food And Milk Components: Research Needs To Expand Uses*. *Journal Of Dairy Science*, 70(11), 2419-2428.
- 71 Kohyama, K. (2020). *Food Texture–Sensory Evaluation And Instrumental Measurement*. *Textural Characteristics Of World Foods*, 1-13.
- 72 Kojima T (1983) *Mechanical Properties And Resonant Vibration Characteristics Of Fruits*, *Bulletin Of Faculty Of Agriculture, Saga University*.
- 73 Kostenko, M. Y., Ruzimurodov, A. A., Byshov, D. N., Golakhov, A. A., And Yakutin, N. N. (2020, January). *Study Of Soil Separation At A Potato Chain With A Cross Rotating Agitator*. In *Iop Conference Series: Earth And Environmental Science (Vol. 422, No. 1, P. 012032)*. Iop Publishing.
- 74 Kothandaraman, S. And Subaramanyan C.P (2007) *Heat And Mass Transfer Data Book ,Sixth Edition New Age International (P) Limited, Ansari Road, Daryaganj, New Delhi – 110002*.
- 75 Krokida, M. K., Kiranoudis, C. T And Maroulis, Z. B. (1999). *Viscoelastic Behaviour Of Dehydrated Products During Rehydration*. *Journal Of Food Engineering*, 40(4), 269-277.

- 76 Krokida, M. K., Oreopoulou, V., And Maroulis, Z. B. (2000). *Effect Of Frying Conditions On Shrinkage And Porosity Of Fried Potatoes*. *Journal Of Food Engineering*, 43(3), 147-154.
- 77 Kubo, M. T., Rojas, M. L., Miano, A. C And Augusto, P. E. (2019). *Rheological Properties Of Tomato Products*.
- 78 Kucukdogan, N., Aydin, L., And Sutcu, M. (2018). *Theoretical And Empirical Thermal Conductivity Models Of Red Mud Filled Polymer Composites*. *ThermochimicaActa*, 665, 76-84.
- 79 Kuzmin, A. V., Bolokhoev, V. S., Ostroumov, S. S., Mantalaeva, S. L., And Labarov, D. B. (2013). *Mechanical Tuber Damage Rate By Potato Diggers*. *Bulletin Of The East Siberian State University Of Technology/VestnikVsgtu*, 44(5).
- 80 Lammari, L, Sana B.K And Kharroubi, H. (2020). *Experimental Study Of Heat Propagation Characteristics In Potatos*. *Sylwan*, 164(6).
- 81 Li, Z., Tong, X., Zhou, B., Ge, X., And Ling, J. (2018). *Design And Efficiency Research Of A New Composite Vibrating Screen*. *Shock And Vibration*, 2018.
- 82 Lienhard, J. H. (2019). *A Heat Transfer Textbook*. Courier Dover Publications.
- 83 Liu, Y., Meng, G., Suo, S., Li, D., Wang, A., Cheng, X., And Yang, J. (2019). *Spring Failure Analysis Of Mining Vibrating Screens: Numerical And Experimental Studies*. *Applied Sciences*, 9(16), 3224.
- 84 Ltaief L, Sana Bk, And Hassen K (2020). *Experimental Study Of Heat Propagation Characteristics In Potatos*. *Sylwan*, 164(6).
- 85 Lu, R., Puri, V.M., And Morrow, C.T.(1988). *Nonlinear Viscoelastic Properties Of Apple Fruit Flesh Under Creep*. *Transactions Of The Asae, Paper No. 886504*.
- 86 Luyten, H., Van Vliet, T., And Walstra, P. (1992). *Comparison Of Various Methods To Evaluate Fracture Phenomena In Food Materials*. *Journal Of Texture Studies*, 23(3), 245-266.
- 87 Majda, P AndSkrodzewicz, J. (2009). *A Modified Creep Model Of Epoxy Adhesive At Ambient Temperature*. *International Journal Of Adhesion And Adhesives*, 29(4), 396-404.
- 88 Markovitz, H. (1977). *Boltzmann And The Beginnings Of Linear Viscoelasticity*. *Transactions Of The Society Of Rheology*, 21(3), 381-398.
- 89 Michalczyk, J., And Cieplak, G. (2016). *Maximal Amplitudes Of Vibrations Of The Suspended Screens, During The Transient Resonance*. *Archives Of Mining Sciences*, 61(3).
- 90 Mohsenin, N.N. (1986). *Physical Properties Of Plant And Animal Materials*. 2nd Revised And Updated Edition. Gordon And Breach Science Publishers, New York
- 91 Mohsenin, N.N., (1980). *Thermal Properties Of Foods And Agricultural Materials*. (Gordon And Breach Science Publishers, New York), Pp. 91–104.
- 92 Mohsenin, N.N., (1986). *Physical Properties Of Plant And Animal Materials*. Gordon And Breach Science Publishers, New York, Usa.
- 93 Molema, G. J. (1999). *Mechanical Force And Subcutaneous Tissue Discolouration In Potato*.
- 94 Mondal, M. A. A. (2003). *Improvement Of Potato (Solanum Tuberosum L.) Through Hybridization And In Vitro Culture Technique*. A Ph. D Thesis. Rajshahi University, Rajshahi, Bangladesh.
- 95 Muir, A.Y., Ostby, P.B And Zender, F.N. (1990). *The Measurement Of The Resistance Of Tuber Skin To Scuffing*. Department Note 30, Scottish Center Of Agricultural Engineering, Penicuik, Scotland
- 96 Murakami, E. G. (1997). *The Thermal Properties Of Potatoes And Carrots As Affected By Thermal Processing 1*. *Journal Of Food Process Engineering*, 20(5), 415-432.

- 97 National Observatory Of Tunisian Agriculture(Onagri) (2014) [Www.Onagri.Nat.Tn/](http://www.onagri.nat.tn/) Accessed On 05/09/2019
- 98 Obidiegwu, J. E., Bryan, G. J., Jones, H. G., And Prashar, A. (2015). *Coping With Drought: Stress And Adaptive Responses In Potato And Perspectives For Improvement. Frontiers In Plant Science*, 6, 542.
- 99 Oey, I., Faridnia, F., Leong, S. Y., Burritt, D. J. And Liu, T. (2017). *Determination Of Pulsed Electric Fields Effects On The Structure Of Potato Tubers. Handbook Of Electroporation; Springer International Publishing: New York, Ny, Usa*, 1-20.
- 100 O'Kelly, B. C. (2005). *New Method To Determine The True Water Content Of Organic Soils. Geotechnical Testing Journal*, 28(4), 365-369.
- 101 Pappas, G., Skinner, G. E., And Rao, V. N. M. (1988). *Effect Of Imposed Strain And Moisture Content On Some Viscoelastic Characteristics Of Cowpeas (Vigna Unguiculata). Journal Of Agricultural Engineering Research*, 39(3), 209-219.
- 102 Pasaman, B., And Zakharchuk, V. (2012). *The Determination Of The Parameters Of A Ploughshare-Rotor Potato Digger. Teka Komisiji Motoryzacji I Energetyki Rolnictwa*, 12(2).
- 103 Pérez, C. J., Alvarez, V. A And Vazquez, A. (2008). *Creep Behaviour Of Layered Silicate/Starch–Polycaprolactone Blends Nanocomposites. Materials Science And Engineering: A*, 480(1-2), 259-265.
- 104 Peters, R. (1996). *Damage Of Potato Tubers, A Review. Potato Research*, 39(4), 479-484.
- 105 Piana, M. L., Oddo, L. P., Bentabol, A., Bruneau, E., Bogdanov, S., And Declerck, C. G. (2004). *Sensory Analysis Applied To Honey: State Of The Art. Apidologie*, 35(Suppl. 1), S26-S37.
- 106 Purkayastha, S., Peleg, M., Johnson, E. A., And Normand, M. D. (1985). *A Computer Aided Characterization Of The Compressive Creep Behavior Of Potato And Cheddar Cheese. Journal Of Food Science*, 50(1), 45-50.
- 107 Rahman, M. S., Rashid, M. M., And Hussain, M. A. (2012). *Thermal Conductivity Prediction Of Foods By Neural Network And Fuzzy (Anfis) Modeling Techniques. Food And Bioprocess Processing*, 90(2), 333-340.
- 108 Ramadan, M. F., And Oraby, H. F. (2016). *Fatty Acids And Bioactive Lipids Of Potato Cultivars: An Overview. Journal Of Oleo Science*, 65(6), 459-470.
- 109 Rao, S. (2020). *Biofortified Crops For “Health And Wealth”, But For Whom? A Gendered Analysis Of Sweet Potato Promotion In Tanzania. Canadian Journal Of Development Studies/Revue Canadienne D Études Du Développement*, 1-19.
- 110 Rastovski, A., Rastovski, A., & Van, A. (1981). *Storage of potatoes (pp. 280-294). Wageningen: Pudoc.*
- 111 Reiner, M. (1964). *The Deborah number. Physics today*, 17(1), 62.
- 112 Rha, C. (1975). *Thermal Properties Of Food Materials. In Theory, Determination And Control Of Physical Properties Of Food Materials (Pp. 311-355). Springer, Dordrecht.*
- 113 Righetti, M. C., Cinelli, P., Mallegni, N., Massa, C. A., Aliotta, L., And Lazzeri, A. (2019). *Thermal, Mechanical, Viscoelastic And Morphological Properties Of Poly (Lactic Acid) Based Biocomposites With Potato Pulp Powder Treated With Waxes. Materials*, 12(6), 990.
- 114 Sahin, S., And Sumnu, S. G. (2006). *Physical Properties Of Foods. Springer Science & Business Media.*
- 115 Salagnac, P., Glouannec, P., And Lecharpentier, D. (2004). *Numerical Modeling Of Heat And Mass Transfer In Porous Medium During Combined Hot Air, Infrared And Microwaves Drying. International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 47(19-20), 4479-4489.
- 116 Salençon, J. (1983). *Calcul A La Rupture Et Analyse Limite.*

- 117 Salunkhe, B.B. Desai, And J.K. Chavan(1989), Potatoes. In *Quality Andpreservation Of Vegetables* (N.A.M. Eskin, Ed.), Crc Press, Boca Raton, P. 1.
- 118 Sarangi, S. K., Maji, B., Sharma, P. C., Digar, S., Mahanta, K. K., Burman, D., ... & Mainuddin, M. (2021). *Potato (Solanum Tuberosum L.) Cultivation By Zero Tillage And Paddy Straw Mulching In The Saline Soils Of The Ganges Delta*. *Potato Research*, 64(2), 277-305.
- 119 Sardi, K., And Yanniotis, S. (2007). *Numerical Modelling Of Heat Transfer In The Food Industry—Recent Developments And Applications*. *Heat Transfer In Food Processing: Recent Developments And Applications*, 21, 1.
- 120 Scanlon, M. G., And Long, A. E. (1995). *Fracture Strengths Of Potato Tissue Under Compression And Tension At Two Rates Of Loading*. *Food Research International*, 28(4), 397-402
- 121 Scott, G. J., Rosegrant, M. W., And Ringler, C. (2000). *Global Projections For Root And Tuber Crops To The Year 2020*. *Food Policy*, 25(5), 561-597.
- 122 Shahgholi, G., Latifi, M., Imani, B And Farrokhi, N. (2020). *Determination Of The Creep Behavior Of Potato Tubers During Storage Period By Means Of Uniaxial And Triaxial Creep Tests*. *Food Science & Nutrition*, 8(4), 1857-1863.
- 123 Shirvani, M., Ghanbarian, D., And Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2014). *Measurement And Evaluation Of The Apparent Modulus Of Elasticity Of Apple Based On Hooke's, Hertz's And Boussinesq's Theories*. *Measurement*, 54, 133-139.
- 124 Shweikani, R., Giadui, T. G., And Durrani, S. A. (1995). *The Effect Of Soil Parameters On The Radon Concentration Values In The Environment*. *Radiation Measurements*, 25(1-4), 581-584
- 125 Singh, F., Katiyar, V. K And Singh, B. P. (2014). *Analytical Study Of Turgor Pressure In Apple And Potato Tissues*. *Postharvest Biology And Technology*, 89, 44-48.
- 126 Singh, R. P., And Heldman, D. R. (1993). *Heat Transfer In Food Processing. Introduction To Food Engineering*. 2nd Ed. Singh R P And Heldman, Dr, Eds. Academic Press, London, 129-224.
- 127 Sinha, A., And Bhargav, A. (2020). *Young's Modulus Estimation In Food Samples: Effect Of Experimental Parameters*. *Mechanics & Industry*, 21(4), 404.
- 128 Sirisomboon, P., Tanaka, M., And Kojima, T. (2012). *Evaluation Of Tomato Textural Mechanical Properties*. *Journal Of Food Engineering*, 111(4), 618-624.
- 129 Spooner, D. M., And Hettterscheid, W. L. (2006). *Origins, Evolution, And Group Classification Of Cultivated Potatoes*. *Darwin's Harvest: New Approaches To The Origins, Evolution, And Conservation Of Crops*, 285-307.
- 130 Stark, J. C., Thornton, M., And Nolte, P. (Eds.). (2020). *Potato Production Systems*. Springer Nature.
- 131 Stewart, G. F., Schweigert, B. S., Hawthorn, J., And Bourne, M. (2012). *Food Texture And Viscosity: Concept And Measurement*. Academic Press.
- 132 Stroshine Richard L (2004). *Physical Properties Of Agricultural Materials And Food Products*. R. Stroshine,).
- 133 Stroshine, R., And Hamann, D. D. (1994). *Physical Properties Of Agricultural Materials And Food Products*. Course Manual.].
- 134 Struik, P. C., And Wiersema, S. G. (1999). *Seed Potato Technology*. Wageningen Academic Publishers.
- 135 Szczesniak, A. S. (2002). *Texture Is A Sensory Property*. *Food Quality And Preference*, 13(4), 215-225.

- 136 Tabatabaeefar, A. (2002). *Size And Shape Of Potato Tubers. International Agrophysics*, 16(4), 301-305.
- 137 Tansakul, A., & Lumyong, R. (2008). *Thermal Properties Of Straw Mushroom. Journal Of Food Engineering*, 87(1), 91-98.
- 138 Toledo, R. T., Singh, R. K., And Kong, F. (2007). *Fundamentals Of Food Process Engineering (Vol. 297)*. New York: Springer.
- 139 Toyokazu Yamada, 1970. *Department Of Industrial Chemistry, Faculty Of Science And Engineering, Chuo University*
- 140 Troncoso, E., Zúñiga, R., Ramírez, C., Parada, J., Andgermain, J. C. (2009). *Microstructure Of Potato Products: Effect On Physico-Chemical Properties And Nutrient Bioavailability. Glob. Sci. Books*, 3, 41-54.
- 141 Tunick, Michael H. (2011) "Food Texture Analysis In The 21st Century." A C S 1477-1480.
- 142 Unal, H., Izli, G., Izli, N., And Asik, B. B. (2017). *Comparison Of Some Physical And Chemical Characteristics Of Buckwheat (Fagopyrum Esculentum Moench) Grains. Cyta-Journal Of Food*, 15(2), 257-265.
- 143 Van Der Zaag, D. E. (1973). *Potatoes And Their Cultivation In The Netherlands. The Hague, Netherlands: Dutch information Center For Potatoes.*
- 144 Wang, L And Sun, D. W. (2002). *Modelling Three-Dimensional Transient Heat Transfer Of Roasted Meat During Air Blast Cooling By The Finite Element Method. Journal Of Food Engineering*, 51(4), 319-328.
- 145 Wang, N., And Brennan, J. G. (1992). *Thermal Conductivity Of Potato As A Function Of Moisture Content. Journal Of Food Engineering*, 17(2), 153-160.
- 146 Wang, N., Reidsma, P., Pronk, A. A., De Wit, A. J. W., And Van Ittersum, M. K. (2018). *Can Potato Add To China's Food Self-Sufficiency? The Scope For Increasing Potato Production In China. European Journal Of Agronomy*, 101, 20-29.
- 147 Weinerowska-Bords, K (2006). *Viscoelastic Model Of Waterhammer In Single Pipeline-Problems And Questions. Archives Of Hydro-Engineering And Environmental Mechanics*, 53(4), 331-351.
- 148 Welty, J., Rorrer, G. L., And Foster, D. G. (2014). *Fundamentals Of Momentum, Heat, And Mass Transfer. John Wiley & Sons.*
- 149 Xin, L., And Liang, J. (2019). *A Dynamic Analysis On The Potato Conveying And Separation System Considering The Acting Force Of A Material. Transactions Of Famena*, 43(Si-1), 35-42.
- 150 Yannas, I And Spector, M. (2004). *Hst. 523j/2.785 J/3.97 J/20.411 J Cell-Matrix Mechanics, Spring 2004.*
- 151 Yunus A. Cengel (2002), *Heat Transfer - A Practical Approach ,Second Edition mcgraw-Hill Education.*
- 152 Zarka, K. A., Kells, D. C., Douches, D. S., And Buell, C. R. (2014). *A Guide To Growing Potatoes In Your Home Garden. Michigan State University, Michigan.*
- 153 Zhang, Y. (2020). *Morphological, Nutritive Composition, Thermal. Vitro Digestibility And Crystallinity Properties Of Starch Extracted From Potato Tubers Stored For A Short Term*, 1, 101.