UNIVERSITÉ DU BURUNDI
GRENIER DU SAVOIR DU BURUNDI
Dépôt institutionnel officiel
https://repository.ub.edu.bi

Contribution à l'étude des effets de la cuisson et du séchage sur la rétention du -carotène (provitamine A) dans la patate douce à chair orange (variété NASPOT 12)

Irankunda, Jean-Marie; Sous la direction de : Prof Pascal Kakana

2025
UB, EANSI
https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/1863

Document téléchargé depuis le **Grenier du Savoir du Burundi** — https://repository.ub.edu.bi

UNIVERSITE DU BURUNDI

Centre d'excellence sous régional en sciences de la nutrition (EANSI)

Département : Sciences des Aliments et Nutrition

Contribution à l'étude des effets de la cuisson et du séchage sur la rétention du β-carotène (provitamine A) dans la patate douce à chair orange (variété NASPOT 12)

Par

Jean-Marie IRANKUNDA

Mémoire présenté et défendu publiquement en vue de l'obtention du

Diplôme de Master en Sciences des Aliments et Nutrition

Option : Technologie et Qualité des Aliments

Sous la direction de :

Professeur Pascal KAKANA

Bujumbura, Janvier 2025

Contribution à l'étude des effets de la cuisson et du séchage sur la rétention du β-carotène (provitamine A) dans la patate douce à chair orange (variété NASPOT 12)

MEMBRES DU JURY :

Président : Dr Ir KARIKURUBU Jean Félix

Secrétaire : Dr MUGANI Richard

Membre : Prof KAKANA Pascal

DEDICACE

A mes chers parents ;

A ma chère épouse ;

A mes frères et sœurs.

Contribution à l'étude des effets de la cuisson et du séchage sur la rétention du β-carotène (provitamine A) dans la patate douce à chair orange (variété NASPOT 12)

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord exprimer toute ma gratitude au directeur de ce mémoire Monsieur le Professeur Pascal KAKANA pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Malgré ses multiples responsabilités, il a accepté de guider mes pas de recherche.

Mes sincères remerciements vont également à l'endroit de tous les professeurs de l'EANSI qui ont contribué à ma formation au cours du cycle de Mastère.

Je remercie aussi le centre d'excellence sous régional en sciences de la nutrition (EANSI), l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU) et le Centre National de Technologie Alimentaire (CNTA) pour la contribution matérielle et financière.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance à Monsieur Bertin Armand BIZUMUREMYI pour son orientation technique lors de l'analyse chimique et à mes camarades étudiants pour leur temps consacré à lire ce mémoire, aux amis et collègues qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Enfin, je voudrais exprimer ma reconnaissance à la Banque Africaine de Développement (BAD) en collaboration avec le Gouvernement du Burundi pour son soutien financier, par l'intermédiaire du projet EANSI, qui m'a permis d'acquérir les connaissances et l'expérience.

Contribution à l'étude des effets de la cuisson et du séchage sur la rétention du β-carotène (provitamine A) dans la patate douce à chair orange (variété NASPOT 12)

RESUME

L'étude a examiné l'effet des méthodes de cuisson et de séchage sur la rétention du β-carotène dans les patates douces à chair orange (PDCO), variété NASPOT 12, et leur capacité à couvrir les besoins en vitamine A. Les tubercules crus, contenant initialement 298,86 µg/g de β-carotène, ont été soumis à différentes techniques de transformation. Les résultats montrent que la rétention du β-carotène varie significativement selon les méthodes utilisées.

Parmi les techniques de cuisson, la cuisson à la vapeur a montré les meilleures performances avec une rétention de 79,2 %**,** suivie par l'ébullition (75,1 %) et la cuisson aux micro-ondes (70,5 %). À l'opposé, des techniques comme la friture ont entraîné une rétention plus faible **(**41,5 %).

Une portion de 100 g de PDCO cuites par n'importe quelle méthode est suffisante pour couvrir intégralement les apports nutritionnels recommandés en vitamine A pour tous les groupes d'âge et les différentes catégories physiologiques.

Pour le séchage, les méthodes modernes et contrôlées se sont avérées supérieures. Le séchage aux micro-ondes (60 °C, 200 W, 3 heures) a permis une rétention de 73 %, suivi de l'étuvage (68,5 %) et du séchage solaire indirect (63,3 %). En revanche, les méthodes lentes, comme le séchage à l'air libre (53,8 %) et au soleil direct (47,4 %) ont entraîné une perte importante de β-carotène.

Une corrélation forte et positive (r = 0,86) a été observée entre la rétention réelle de β-carotène et la capacité de réhydratation (CR) des farines. Les farines obtenues par séchage aux micro-ondes et en étuve ont affiché les meilleures CR, respectivement de 2,00 et 1,95 tandis que celles issues de méthodes lentes, comme le séchage à l'air libre (CR = 1,56) et au soleil direct (CR = 1,14), ont présenté des valeurs inférieures en raison des dommages structurels causés par l'oxydation et la dégradation thermique prolongée.

Ces résultats soulignent l'importance des techniques de transformation douces et contrôlées pour préserver la qualité nutritionnelle des PDCO et optimiser leur contribution à la couverture des besoins en vitamine A. Il est recommandé de promouvoir ces méthodes dans les foyers et l'industrie alimentaire afin de lutter efficacement contre la carence en vitamine A, notamment dans les régions vulnérables comme le Burundi.

Mots clés : patates douces à chair orange, cuisson, séchage, rétention du β-carotène, capacité de réhydratation, couverture des besoins en vitamine A.

Contribution à l'étude des effets de la cuisson et du séchage sur la rétention du β-carotène (provitamine A) dans la patate douce à chair orange (variété NASPOT 12)

ABSTRACT

The study examined the effect of cooking and drying methods on the retention of β-carotene in orange-fleshed sweet potatoes (OFSP), variety NASPOT 12, and their ability to meet the vitamin A requirements. Raw tubers, initially containing 298.86 µg/g of β-carotene, were subjected to various processing techniques. The results show that β-carotene retention varies significantly depending on the methods used.

Among the cooking methods, steaming achieved the highest retention rate at 79.2%, followed by boiling (75.1%) and microwave cooking (70.5%). In contrast, frying resulted in significantly lower retention rates (41.5%).

A 100 g portion of Orange-Fleshed Sweet Potatoes (OFSP) cooked by any method is enough to fully cover the recommended nutritional intake of vitamin A for all age groups and physiological categories.

Regarding drying techniques, modern and controlled methods demonstrated superior efficiency. Microwave drying (60 °C, 200 W, 3 hours) achieved a β-carotene retention rate of 73%, followed by oven drying (68.5%) and indirect solar drying (63.3%). Conversely, slower methods, such as air drying (53.8%) and direct solar drying (47.4%), resulted in substantial β-carotene losses.

A high positive correlation (r = 0.86) was observed between the real retention of β-carotene and the rehydration capacity (RC) of the flours. Flours obtained by microwave and steaming drying exhibited the best RC, 2.00 and 1.95, respectively, while those from slow methods, such as air drying (RC = 1.56) and direct solar drying (RC = 1.14), showed lower values due to structural damage caused by oxidation and prolonged thermal degradation.

These results highlight the importance of gentle and controlled processing techniques to preserve the nutritional quality of OFSP and optimize their contribution to meeting vitamin A requirements. It is recommended to promote these methods in households and the food industry to effectively combat vitamin A deficiency, particularly in vulnerable regions such as Burundi.

Keywords: orange-fleshed sweet potatoes, cooking, drying, β-carotene retention, rehydration capacity, vitamin A coverage.

Contribution à l'étude des effets de la cuisson et du séchage sur la rétention du β-carotène (provitamine A) dans la patate douce à chair orange (variété NASPOT 12)

TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY : i

DEDICACE ii

REMERCIEMENTS iii

RESUME..... iv

ABSTRACT.....v

TABLE DES MATIERES..... vi

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS xi

LISTE DES FIGURES xii

LISTE DES TABLEAUX..... xii

AVANT-PROPOS..... xiv

INTRODUCTION GENERALE 1

1. Contexte..... 1

2. Signification de l'étude..... 2

3. Hypothèses de recherche..... 3

4. Objectifs du travail..... 4

Chapitre I. GENERALITES SUR LA PATATE DOUCE A CHAIR ORANGE 5

I.1. Propriétés et importance du β-carotène pour la santé humaine 5

I.2. Sources de vitamine A pour l'homme..... 6

I.3. La PDCO comme aliment source de vitamine A..... 9

I.3.1. Description botanique et culture.....9

I.3.2. Les apports nutritionnels recommandés en vitamine A.....12

I.4. Facteurs pouvant influencer la teneur en provitamine A dans les PDCO crues 13

I.4.1. Facteurs génétiques 13

I.4.3. Pratiques agricoles.....15

I.4.4. Maturité à la récolte et conditions de récolte 15

I.4.5. Conservation et stockage préliminaires.....16

Chapitre II. TECHNIQUES DE TRANSFORMATION 17

II.1. LA CUISSON 17

II.1.1. Pourquoi la cuisson des tubercules de PDCO ?..... 17

II.1.2. Facteurs affectant la teneur en provitamine A des PDCO pendant la cuisson 18

II.1.2.1. Méthode de cuisson.....18

II.1.2.2. Présence d'oxygène 20

II.1.2.3. pH du milieu de cuisson.....21

II.1.2.4. Prétraitement physique et chimique des tubercules 21

II.1.2.5. Variété de patate douce à chair orange 22

II.1.3. La transformation de PDCO cuites en purée 22

II.1.3.1. La méthode de cuisson recommandée pour la purée de PDCO.....22

II.1.3.2. Purée de PDCO : technique de conservation 23

II.1.3.3. Choix de l'emballage.....24

II.2. LE SECHAGE.....25

II.2.1. Pourquoi le séchage des tubercules de PDCO ? 25

II.2.2. Facteurs affectant la teneur en provitamine A des PDCO pendant le séchage..... 25

a) Température de séchage 25

b) Durée de séchage.....26

c) Exposition à la lumière.....26

d) Teneur en humidité.....27

e) Prétraitements physique et chimique.....27

f) Méthode de séchage.....28

g) Maturité du tubercule.....28

i) Atmosphère de séchage.....29

II.2.3. Influence des méthodes de séchage sur la capacité de réhydratation des farines..... 29

II.2.4. Conditionnement et emballage des farines de PDCO..... 30

II.2.4.1. Conditionnement.....30

II.2.4.2. Emballage.....31

II.3. MECANISMES DE DEGRADATION DU β-CAROTENE.....31

Chapitre III. MATERIELS ET METHODES.....32

III.1. Matériel végétal d'étude..... 32

III.2. Produits chimiques..... 32

III.3. Préparation, prétraitement et transformation des PDCO..... 32

III.3.1. Cuisson.....32

III.3.2. Séchage.....34

III.4. Préparation de la solution étalon..... 35

III.4.1. Préparation de la solution étalon mère.....35

III.4.2. Préparation des solutions étalons filles.....35

III.5. Traçage de la courbe d'étalonnage..... 36

III.6. Extraction du β-carotène..... 36

III.7. Séparation du β-carotène des autres caroténoïdes liposolubles..... 37

III.8. Détermination du nombre d'extraits..... 37

III.9. Mesure de l'absorbance 38

III.10. Calcul de la teneur en β-carotène 38

III.11. Calcul de la rétention du β-carotène 39

III.12. Calcul de la capacité de réhydratation 39

III.13. Traitement des résultats 40

Chapitre IV. RESULTATS ET DISCUSSION 41

IV.1. Présentation des résultats 41

IV. 1.1. Droite d'étalonnage 41

IV.1.2. Teneur en β-carotène dans les tubercules de PDCO crus 42

IV.1.3. Teneurs en β-carotène pour les différentes méthodes de cuisson 43

IV.1.4. Couverture des besoins en vitamine A selon l'âge, le sexe, l'état physiologique et par méthode de cuisson 45

IV.1.5. Impact des différentes méthodes de cuisson sur la rétention du β-carotène dans les patates douces à chair orange 47

IV.1.5. 1. Rétention du β-carotène 47

IV.1.5.2. Comparaison des méthodes de cuisson 48

IV.1.5.3. Impact sur la valeur nutritionnelle 49

IV.1.5.4. Conclusion partielle 49

IV.1.6. Teneurs en β-carotène après les différentes méthodes de séchage 49

IV.1.7. Impact des différentes méthodes de séchage sur la rétention du β-carotène dans les patates douces à chair orange 50

IV.1.7.1. Teneur en β-carotène après séchage 51

IV.1.7.2. Rétention du β-carotène 51

IV.1.7.3. Comparaison des méthodes de séchage 52

IV.1.7.4. Conclusion partielle.....53

IV.1.8. Capacité de réhydratation des farines de PDCO 53

IV.1.9. Corrélation entre la rétention de β-carotène et la capacité de réhydratation 55

IV.2. Discussion des résultats..... 56

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS.....59

PERSPECTIVES D'AVENIR.....60

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....61

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

A : Absorbance

ANR : Apports Nutritionnels Recommandés

C : Concentration

CR : Capacité de Réhydratation

CVA : Carence en Vitamine A

Dr Ir : Docteur Ingénieur

EAR : équivalent de l'activité rétinol

ER : équivalent-rétinol

FAO : Food and Agriculture Organization

HPLC : High Performance Liquid Chromatography

ISABU : Institut des Sciences Agronomiques du Burundi

ISTEEBU : Institut des Statistiques et d'Etudes Economiques du Burundi

PDCO : Patate Douce à Chair Orange

PED : pays en voie de développement

Prof : Professeur

RA : rétention apparente

RR : rétention réelle

T/ha : tonne par hectare

UV : ultra-violet

V.E : volume extrait.

WHO : World Health Organization

µg/g : microgrammes (10^{-6}grammes) par gramme

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Structures chimiques de **(a)** β-carotène, **(b)** α-carotène et **(c)** β-cryptoxanthine.....5

Figure 2: Tubercules de PDCO.....8

Figure 3: Droite d'étalonnage du β-carotène pur à 95%.....42

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les 49 nutriments essentiels connus pour le maintien de la vie humaine 7

Tableau 2 : Variétés des PDCO en diffusion au Burundi (ISABU, 2023). 11

Tableau 3 : Apports nutritionnels recommandés en vitamine A.....12

Tableau 4 : Données des études faites sur la rétention du β-carotène dans les PDCO cuites à l'ébullition 19

Tableau 5: Données des études faites sur la rétention du β-carotène dans les PDCO cuites à la vapeur 19

Tableau 6 : Formules pour calculer la teneur du β-carotène en µg dans 1g de l'échantillon 39

Tableau 7: Concentrations et Absorbances des solutions étalons du *β*-carotène pur à 95% 41

Tableau 8 : Absorbances, concentrations et teneur en β-carotène dans l'échantillon cru de PDCO 43

Tableau 9: Absorbances, concentrations, teneur en β-carotène et valeur en vitamine A de PDCO après les différentes méthodes de cuisson.....44

Tableau 10 : Pourcentage de couverture des besoins en vitamine A /100 g de PDCO consommée 46

Tableau 11: Pourcentage de rétention du β-carotène après les différentes méthodes de cuisson.....47

Tableau 12: Absorbances, concentrations, teneur en β-carotène et valeur en vitamine A de PDCO après les différentes méthodes de séchage.....50

Tableau 13: Pourcentage de rétention du β-carotène dans les PDCO après les différentes méthodes de séchage 51

Tableau 14: Capacité de réhydratation des farines de PDCO obtenues après les différentes méthodes de séchage 53

Tableau 15 : Relation entre le pourcentage de rétention du β-carotène dans les PDCO après séchage et la capacité de réhydratation des farines obtenues 55

Contribution à l'étude des effets de la cuisson et du séchage sur la rétention du β-carotène (provitamine A) dans la patate douce à chair orange (variété NASPOT 12)

AVANT-PROPOS

Ce mémoire rentre dans le cadre de l'obtention du diplôme de Master en Sciences des Aliments et Nutrition, option Technologie et Qualité des Aliments. Dans ce travail, la rétention du β-carotène dans les tubercules de PDCO transformés selon les différentes techniques comme la cuisson et le séchage a été déterminée. Les méthodes de transformation qui préservent le mieux le β-carotène ont été proposées. Pour une utilisation ultérieure de l'aliment cuit, nous avons proposé de réduire des PDCO cuites en purée et en farine pour les PDCO déshydratées. Pour ce dernier cas, la capacité de réhydratation de la farine de PDCO obtenues après les différentes méthodes de séchage a été évaluée. L'idée de ce travail de recherche est née du constat que l'impact de la cuisson et du séchage sur la rétention des micronutriments, en particulier le β-carotène dans les tubercules de PDCO n'est pas maitrisé.

En effet selon la littérature, la teneur en β-carotène dans les PDCO transformées varie selon la technique appliquée.

Ce travail se veut être une contribution devant permettre aux consommateurs de PDCO en général et plus particulièrement aux unités de transformation de la farine de PDCO et aux industriels alimentaires d'être éclairés par rapport à l'impact des effets de la cuisson et du séchage sur la rétention du β-carotène abondant dans les tubercules de PDCO. Pour y arriver, une étude sur la teneur en β-carotène des tubercules de PDCO crues, cuites et séchées selon les différentes méthodes a été menée. Les échantillons récoltés à l'état de maturité optimale sont obtenus de la part de l'ISABU Gisozi, en province Mwaro, au Burundi.

Les résultats de ce travail devraient aider les consommateurs et les industriels alimentaires dans le choix des techniques de transformation qui préservent le mieux les nutriments contenus dans les tubercules de PDCO, notamment le β-carotène.

Contribution à l'étude des effets de la cuisson et du séchage sur la rétention du β-carotène (provitamine A) dans la patate douce à chair orange (variété NASPOT 12)

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte

Au Burundi, selon ISTEEBU (2017), 43.6% des enfants de moins de cinq ans, 20-25% des femmes enceintes, 22% des enfants d'âge scolaire, 18% des adolescents et 7% des personnes âgées avaient une carence en vitamine A. Pour la prévention et le contrôle de cette carence, l'approche la plus appropriée et à long terme est de s'assurer que les régimes alimentaires fournissent des quantités adéquates de cette vitamine. Afin que les aliments riches en β-carotène disponibles localement, par exemple les patates douces à chair orange (PDCO), puissent être utilisés efficacement pour lutter contre la carence en vitamine A, il est important d'obtenir des données analytiques précises concernant la teneur et la rétention de cette provitamine A après la transformation, ici la cuisson et le séchage. Selon les travaux de Stahl & Sies (2005), Mordi et al (2020), le β-carotène est susceptible d'être détruit par la chaleur, la lumière et l'oxygène avec comme conséquences des pertes considérables de l'activité de la vitamine A. Il est donc nécessaire d'évaluer les effets des procédures de prétraitement, de cuisson et du séchage sur les teneurs en β-carotène des PDCO, un aliment biofortifié naturellement, disponible pour les burundais.

En effet, la courte durée de conservation de PDCO due à sa périssabilité constitue un défi majeur. Pour y remédier, une déshydratation des tubercules de PDCO se veut nécessaire car elle permet de réduire leur teneur en eau afin de minimiser les sources de dégradation microbienne et autres détériorations pendant le stockage. Cette technique de préservation permet de maintenir les nutriments, la couleur et la saveur des tubercules tout en augmentant leur durée de stockage jusqu'à un an ou plus, selon les méthodes employées. Les méthodes modernes de déshydratation telles que le séchage sous vide et le séchage au micro-ondes sont particulièrement efficaces pour conserver la qualité des produits séchés (Muhammad Tayyab Rashid, 2022).

Parallèlement à ce défi, les tubercules crus de PDCO sont indigestes, ont une texture dure et un goût moins agréable, présentent des anti-nutriments pouvant réduire ou interférer avec l'absorption des nutriments utiles pour une bonne santé humaine.

Pour une meilleure absorption de ces nutriments, les PDCO sont soumises à l'une des techniques de cuisson disponibles par exemples l'ébullition, la cuisson à la vapeur, la friture, etc.

La cuisson permet d'améliorer des qualités microbiologiques et organoleptiques, la destruction des constituants toxiques et des facteurs antinutritionnels, ainsi qu'une augmentation de la digestibilité des nutriments (Yao et al., 2023). La PDCO étant une culture saisonnière, la transformation au moment de la récolte est nécessaire pour minimiser les pertes post-récolte, rendre les produits à base de PDCO disponibles à la population tout au long de l'année et permettre de proposer le produit sous différentes formes alimentaires.

2. Signification de l'étude

La patate douce est l'une des cultures vivrières principales largement cultivées par les agriculteurs burundais. Elle est la 3ème culture de grande importance au Burundi, après le manioc et le bananier, avec environ 800 mille tonnes produits en 2016 (ISABU, 2018). Depuis 2010, le Burundi a commencé à cultiver, de manière plus organisée et intensive, des variétés de PDCO en tant que culture stratégique pour améliorer la nutrition et la sécurité alimentaire dans le pays (ISABU, 2018)**.** Sur le plan nutritionnel, la PDCO est une excellente source de provitamine A, de fibres, de vitamines B et C, ainsi que de minéraux comme le calcium, le phosphore, le potassium et le fer (Campos & Caligari, 2017).

Au Burundi, dans les préparations culinaires domestiques, la PDCO est fréquemment consommée bouillie, frite ou grillée et certains ménages urbains cuisent à la vapeur ou aux micro-ondes. Dans certaines localités rurales, la PDCO est consommée après la cuisson en cendres chaudes et dans le commerce, on constate que la PDCO est vendue sous forme de frits (chips) ou rôtie. Ainsi, la cuisson des PDCO améliore leur digestibilité et rend ces nutriments plus accessibles. En termes de goût, la PDCO cuite est douce et savoureuse, ce qui en fait un aliment apprécié dans diverses préparations culinaires (Kidmose et al., 2007; Yao et al., 2023).

En outre, les PDCO sont périssables en raison de leur forte teneur en eau, ce qui pose un défi majeur pour leur conservation dans les conditions tropicales. Cette forte teneur en eau favorise le développement rapide de moisissures et de pourritures, réduisant ainsi considérablement leur durée de conservation (Abong' et al., 2016; Hodges et al., 2011).

Les conditions tropicales, caractérisées par des températures élevées et une humidité relative importante, accélèrent la détérioration des tubercules de PDCO.

Pour remédier à ce problème, des pratiques de transformation telles que le séchage ou la conversion en produits stables, sont souvent nécessaires pour prolonger leur durée de vie et assurer leur disponibilité tout au long de l'année.

Il convient de souligner que les produits transformés sont plus stables, plus faciles à stocker et à transporter, ce qui est essentiel pour garantir une disponibilité constante et sécurisée. En outre, afin de répondre aux diverses préférences des consommateurs, d'intégrer les PDCO dans différents régimes alimentaires, d'augmenter les opportunités de marché pour les producteurs et de rendre les PDCO accessibles sous diverses formes tout au long de l'année, indépendamment des saisons de récolte, il est indispensable de procéder à leur transformation.

Cependant, la transformation des tubercules de PDCO peut altérer leur valeur nutritive, y compris la teneur en provitamine A (β-carotène). Cette étude a été entreprise afin d'approfondir les connaissances sur la rétention du β-carotène dans les tubercules de PDCO soumis à diverses méthodes de cuisson et de séchage, ainsi que sur la capacité de réhydratation des farines obtenues.

Au Burundi, peu d'études ont été menées (à notre connaissance) sur l'impact de la cuisson et du séchage sur la rétention du β-carotène dans les PDCO.

Cela rend nécessaire une analyse chimique et comparative de la teneur en β-carotène dans les PDCO après chaque technique de transformation. C'est pour répondre à ce besoin que nous avons mené une recherche intitulée : « **Contribution à l'étude des effets de la cuisson et du séchage sur la rétention du β-carotène (provitamine A) dans la patate douce à chair orange (variété NASPOT 12) »**.

3. Hypothèses de recherche

- La PDCO à haute température et /ou pendant cuisson des tubercules de un temps long et en plein air, par exemple la friture et la grillade, pourrait dégrader une partie de β-carotène.

On pourrait penser que les méthodes de cuisson plus douces et qui limitent l'exposition des PDCO à l'oxygène, comme la cuisson à la vapeur, la cuisson en cendre ou aux micro-ondes préservent mieux le β-carotène.

- Le processus de séchage pourrait altérer la structure des tubercules et affecter la stabilité du β-carotène. On pourrait envisager que des méthodes de séchage douces et protégés de la lumière UV comme le séchage par le froid (lyophilisation), à l'étuve ou aux micro-ondes préservent mieux le β-carotène plus que le séchage solaire ou à l'air libre.
- On pourrait penser qu'une meilleure rétention du β-carotène est associée à une meilleure capacité de réhydratation des farines.

4. Objectifs du travail

➢ L'**objectif global** de cette étude est d'évaluer les effets des différentes méthodes de cuisson et de séchage sur la rétention du β-carotène dans les tubercules de PDCO et comparer la capacité de réhydratation des farines obtenues. Cette recherche vise à promouvoir des pratiques optimales pour maximiser les bénéfices nutritionnels de ce tubercule, contribuant ainsi à lutter contre les carences en vitamine A (CVA) dans les populations vulnérables.

➢ Les **objectifs spécifiques** de cette étude sont :

- Comparer la rétention du β-carotène après différentes méthodes de cuisson des PDCO et identifier les méthodes de cuisson qui préservent le plus de β -carotène.
- Comparer la rétention du β-carotène après différentes méthodes de séchage des PDCO et identifier les méthodes de séchage qui conservent le mieux le β-carotène.
- Mesurer et comparer la capacité de réhydratation des farines issues de ces différentes méthodes de séchage et identifier les méthodes de séchage produisant les farines ayant la meilleure capacité de réhydratation.
- Analyser les relations entre la rétention du β-carotène et la capacité de réhydratation et comprendre comment la rétention de β-carotène peut influencer la qualité des farines en termes de réhydratation.
- Recommander des méthodes optimales de cuisson et de séchage pour maximiser la rétention du β-carotène et améliorer la capacité de réhydratation et suggérer des applications pratiques dans l'industrie alimentaire pour la production de farines de PDCO de haute qualité nutritionnelle.

Chapitre I. GENERALITES SUR LA PATATE DOUCE A CHAIR ORANGE

I.1. Propriétés et importance du β-carotène pour la santé humaine

Le β-carotène est une molécule appartenant à la famille des caroténoïdes provitaminiques A, qui inclut également l'α-carotène et la β-cryptoxanthine (figure 1). C'est un type de pigment organique que l'on trouve principalement dans les plantes et les fruits, en particulier les carottes et les légumes-feuilles vert foncé. Cette molécule liposoluble, de couleur orange et de formule chimique $C_{40}H_{56}$, est soluble dans des solvants non polaires tels que l'hexane ou le méthanol. Elle présente une absorbance plus élevée dans l'hexane que dans le méthanol (Zang et *al*., 1997). De plus, avec un pic d'absorption caractéristique autour de 450 nm (Delia B. Rodriguez-Amaya and Mieko Kimura, 2004), cette propriété spectrale permet non seulement d'identifier sa présence dans un échantillon de PDCO, mais également de quantifier sa concentration.

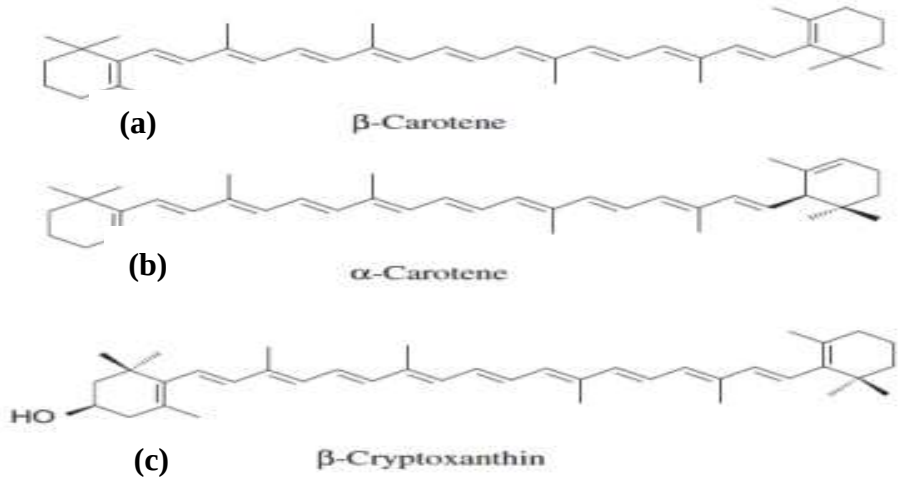


Figure 1: Structures chimiques de **(a)** β-carotène, **(b)** α-carotène et **(c)** β-cryptoxanthine

Le β-carotène est un puissant antioxydant qui aide à neutraliser les radicaux libres dans l'organisme, réduisant ainsi le stress oxydatif et le risque de maladies chroniques telles que les maladies cardiovasculaires et certains cancers (Gombart et *al*., 2020; Nimse & al, 2015).

Le β-carotène est converti en rétinol (forme active de la vitamine A) dans le corps humain à un taux de 12 :1 (IOM, 2001). La vitamine A est essentielle pour la vision notamment en prévenant la cécité nocturne et d'autres troubles visuels (Tanumihardjo, 2002).

Elle est donc particulièrement recommandée pour renforcer le système immunitaire, prévenir et limiter les infections (Oliveira et *al*., 2018).

Cette vitamine est aussi essentielle pour la synthèse du collagène, une protéine indispensable à la construction et à la réparation de la peau (VanBuren & Everts, 2022).

I.2. Sources de vitamine A pour l'homme

L'alimentation humaine contient deux sources de vitamine A : la vitamine A préformée (rétinol et esters de rétinyl) et les provitamines A (caroténoïdes, principalement le β-carotène) (Blaner, 2020). La vitamine A de formule chimique $C_{20}H_{30}O$, également connue sous le nom de rétinol dans sa forme biologiquement active, est un micronutriment liposoluble indispensable, impliqué dans de nombreuses fonctions physiologiques.

- La vitamine A préformée se trouve préférentiellement dans les aliments d'origine animale, tels que les huiles de foie de poisson, les produits laitiers, le jaune de l'œuf et les foies d'animaux (Blaner, 2020; Vidailhet et *al*., 2017).

Cependant, ces aliments, bien qu'étant de bonnes sources de vitamine A, sont souvent trop coûteux pour les populations rurales pauvres. En revanche, les cultures biofortifiées avec de la provitamine A offrent une source pratique et accessible de vitamine A, contrairement aux autres programmes d'enrichissement et de supplémentation en micronutriments qui nécessitent des intrants plus coûteux.

- Les caroténoïdes provitaminiques A sont des pigments végétaux. Parmi eux, le β-carotène est le plus efficace pour cette conversion (1 équivalent-rétinol (ER)=1 µg de rétinol = 12 µg de β-carotène = 24 µg d'autres caroténoïdes provitaminiques A) (Haskell et *al*., 2004).

Il faut rappeler que la vitamine A est l'un des trois micronutriments essentiels (tableau 1) et dont les carences ont des conséquences dévastatrices pour de nombreuses personnes (Magee & McCann, 2019; OMS, 2011) aux côtés du fer (LINUS PAULING INSITUTE, 2016) et l'iode (Ofori et *al.*, 2022). Un manque de vitamines et de minéraux essentiels entraîne souvent une "faim cachée", une forme de malnutrition moins apparente, où les signes de dénutrition et de faim sont moins visibles. Une personne peut consommer une quantité suffisante de calories sans pour autant recevoir les micronutriments adéquats (Kennedy et *al.*, 2007).

La faim cachée a des conséquences négatives sur la santé humaine comme le retard de croissance et développement (WHO, 2009), l'affaiblissement du système immunitaire et la vulnérabilité aux infections (Shankar & Prasad, 2018), des troubles cognitifs et comportementaux (Grantham-McGregor et *al*., 2007), des complications pendant la grossesse (A. Welch, 2021).

Tableau 1 : Les 49 nutriments essentiels connus pour le maintien de la vie humaine

Eau et énergie	**Protéines (acides aminés)**	**Lipides-graisses (acides gras)**	**Macroéléments**	**Microéléments**	**Vitamines**
Eau Glucides	Histidine Isoleucine Lysine Méthionine Phénylalanine Thréonine Tryptophane Valine	Acides linoléiques Acides linoléniques	Na P Ca Mg S P Cl	Fe Zn Cu Mn I F B Se Mo Ni Cr V Si As Sn Co	A D E K C (acide ascorbique) B1 (thiamine) B2 (riboflavine) B3 (acide pantothénique) Niacine B6 (pyridoxal) Folate Biotine B12 (cobalamine)

Source: R. M. Welch & Graham (2004)

La carence en vitamine en vitamine A (CVA) a des conséquences particulièrement graves pour les enfants et les femmes enceintes, incluant des troubles de la vision allant de la cécité nocturne à la xérophtalmie (Sommer & West, 1998). Elle affaiblit le système immunitaire**,** augmentant la susceptibilité aux infections respiratoires (par exemple la pneumonie) et aux maladies diarrhéiques chez les enfants (Black et *al*., 2008; Semba, 1999). Elle cause également un retard de croissance physique (en perturbant le métabolisme des protéines et la division cellulaire), des retards cognitifs et des difficultés d'apprentissage (Rice et *al.*, 2000).

Dans de nombreuses régions du monde, en particulier dans les pays en voie de développement (PED), la CVA est l'une des déficiences nutritionnelles les plus répandues, avec des conséquences graves pour la santé. Pour y remédier, il est essentiel de consommer des aliments riches en provitamine A, une approche soutenue par des études scientifiques et des organisations de santé publique. Illustrés dans la figure 2, les PDCO se distinguent des autres types de patates douces par leur richesse en β-carotène (Ailla et *al*., 2009; Bogacz-Radomska & Harasym, 2018; J. et *al*., 2021) et au Burundi, cette variété s'est révélée efficace pour lutter contre la CVA, grâce à ses concentrations élevées en β-carotène (ISABU, 2018).

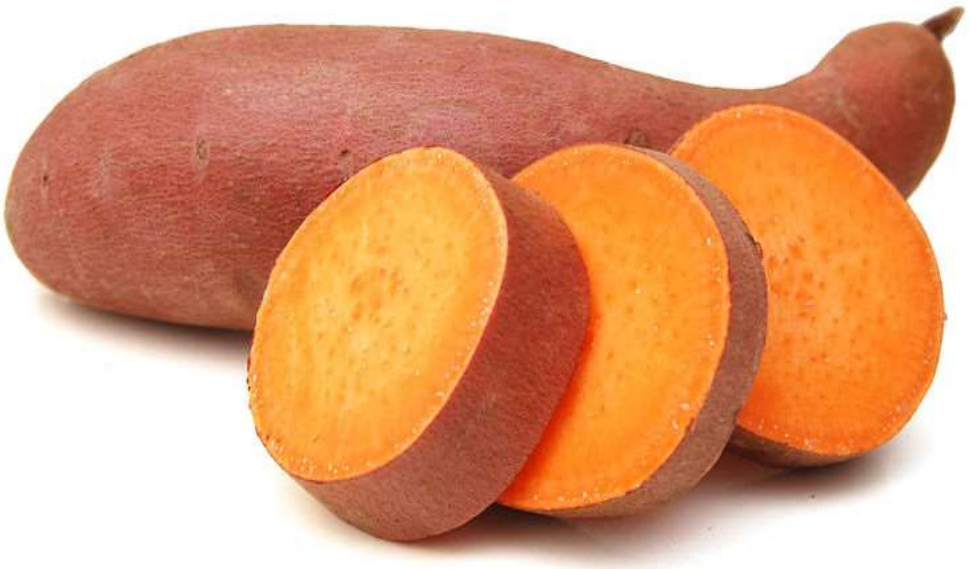


Figure 2: Tubercules de PDCO

I.3. La PDCO comme aliment source de vitamine A

Tous les types de patates douces sont de bonnes sources de minéraux et de vitamines dont le potassium, phosphore, vitamines C, K, E, le complexe vitaminique B et les fibres alimentaires (Bovell-Benjamin, 2007). L'intérieur de la patate douce (chair) est de différentes couleurs : blanc, crème, jaune, orange, violet et pourpre. Seules les PDCO contiennent de grandes quantités de β-carotène, un antioxydant (anticancéreux) que l'organisme convertit en rétinol (forme active de la vitamine A) dans le corps humain à un taux de 12 :1 (IOM, 2001).

La vitamine A est essentielle pour la santé des yeux, un système immunitaire fort et une peau saine (Sommer & West, 1998). Plus la couleur orange est foncée, plus la quantité de β-carotène est importante.

Toutefois, les racines tubéreuses de PDCO peuvent être exploitées pour leur richesse en calories afin d'atténuer la malnutrition protéino-énergétique mais elles sont recommandées pour lutter contre la CVA (Vimala et *al*., 2011).

I.3.1. Description botanique et culture

La patate douce, plante rampante, vivace de la famille des *Convolvulaceae*, développe des racines tubéreuses, charnues et épaisses, qui sont les organes de réserve comestibles. Ces racines tubéreuses sont le résultat de l'accumulation de nutriments dans des racines spécialisées, permettant à la plante de survivre dans des conditions défavorables et de se reproduire (Ku et *al*., 2008; Wang et *al*., 2015). Ces tubercules peuvent varier en forme, allant de fusiformes à presque sphériques, et leur couleur externe peut être brune, beige, rouge, violette, ou orange (Wang et *al*., 2015). La chair des tubercules est de couleur orange vif, riche en β-carotène, un précurseur de la vitamine A. Cette couleur est due à la présence de caroténoïdes, qui sont des antioxydants bénéfiques pour la santé humaine. Ses caractéristiques agronomiques, telles qu'une large adaptabilité, une forte productivité, un cycle de développement court et une valeur nutritionnelle élevée, font de la PDCO une culture particulièrement importante pour la sécurité alimentaire dans les pays soumis à de fortes pressions anthropiques et vulnérables aux changements climatiques. La PDCO préfère un climat chaud et ensoleillé pour un développement optimal et nécessite un sol bien drainé, riche en matière organique, avec un pH légèrement acide à neutre entre 5,0 et 6,5 (Bovell-Benjamin, 2007; Low et *al*., 2017).

La PDCO se reproduit exclusivement par voie végétative, le matériel végétal (boutures) est donc facilement partagé entre les agriculteurs. La propagation se fait principalement par boutures de tiges (de 20 à 50 cm de long comportant 3 à 4 nœuds) ou par plantation de tubercules entiers ou de fragments de ceux-ci.

La culture se fait habituellement en billons de manière à faciliter tant l'irrigation que la récolte (Lemma, 2015). La PDCO a généralement un cycle végétatif court, entre 90 et 150 jours, pouvant varier en fonction de plusieurs facteurs, notamment les conditions climatiques locales, les pratiques culturales et les variétés cultivées (Lemma, 2015).

Au Burundi, comme on le trouve dans le tableau 2, onze variétés de PDCO sont actuellement cultivées.

Tableau 2 : Variétés des PDCO en diffusion au Burundi (ISABU, 2023).

Variétés	**Couleur de la peau**	**Rendement (T/ha)**	**Zone de culture**	**Sensibilité aux viroses**	**Sensibilité à l'Anthracnose**
NASPOT 12	Peau rouge, chair orange	20	Basse, moyenne et haute altitudes	Tolérante	Tolérante
Amelia	Peau en kaki, chair orange	23.75	Basse, moyenne et haute altitude	Tolérante	Tolérante
Irene	Peau rouge, chair orange	26.39	Basse, moyenne et haute altitude	Tolérante	Tolérante
NASPOT 9	Peau rouge, chair orange	31.25	Basse, moyenne et haute altitude	Tolérante	Tolérante
Mayai	Peau en kaki, chair orange	19.86	Basse, moyenne et haute altitude	Tolérante	Tolérante
Bwanyule	Peau en kaki, chair orange	13	Basse, moyenne et haute altitude	Tolérante	Tolérante
97062	Peau rouge, chair orange	25 - 30	Tout le pays	Tolérante	Tolérante
Cacearpedo	Peau rouge, chair orange	13 - 15	Tout le pays	Tolérante	Tolérante
NASPOT 10-25	Peau en kaki, chair orange	50 - 55	Basse, moyenne et haute attitude	Tolérante	Tolérante
Inzovu y'umugamba 10	Peau en kaki, chair orange	47 - 50	Basse, moyenne et haute attitude	Tolérante	Tolérante
NASPOT 13	Peau en kaki, chair orange	37 - 39	Basse, moyenne et haute attitude	Tolérante	Tolérante

I.3.2. Les apports nutritionnels recommandés en vitamine A

Comme le montre le tableau 3, les apports nutritionnels recommandés (ANR) en vitamine A varient en fonction de l'âge, du sexe et des états physiologiques comme la grossesse et l'allaitement.

Tableau 3 : Apports nutritionnels recommandés en vitamine A

Groupe d'âge	**Apport journalier recommandé (µg EAR)**	**Groupe d'âge**	**Apport journalier recommandé (µg EAR)**
Nourrissons (0-6 mois)	375	Nourrissons (0-6 mois)	400
Nourrissons (7-12 mois)	400	Nourrissons (7-12 mois)	500
Enfants (1-3 ans)	400	Enfants (1-3 ans)	300
Enfants (4-6 ans)	450	Enfants (4-8 ans)	400
Enfants (7-9 ans)	500	Enfants (9-13 ans)	600
Adolescents (10-18 ans)	600	Adolescents (14-18 ans)	900 (Homme) /700 (Femme)
Adultes (19-65 ans)	600 (Homme) / 500 (Femme)	Adultes (19-70 ans et plus)	900 (Homme) /700 (Femme)
Adultes (65 ans et plus)	600 (Homme) / 600 (Femme)	Femmes enceintes (14-18 ans)*	750
Femmes enceintes	800	Femmes enceintes (19-50)**	770
Femmes allaitantes	850	Femmes allaitantes*/**	1200/1300
Référence : (FAO & WHO, 2004)		Référence : IOM (2001)	

EAR: équivalent de l'activité rétinol; FAO: Food and Agriculture Organization; WHO: World Health Organization; IOM: United States institute of medicine.

Ces valeurs sont exprimées en microgrammes d'équivalents d'activité rétinol (EAR), une unité qui prend en compte les différentes formes de vitamine A (rétinol, β-carotène, etc.) disponibles dans l'alimentation.

Pour les provitamines A, l'apport n'est pas associé à une toxicité car le corps limite la conversion en rétinol en fonction des besoins physiologiques. En revanche, les apports en rétinol préformé (issus de compléments alimentaires ou de sources animales) peuvent entrainer une toxicité (FAO & WHO, 2004; IOM, 2001).

Remarque : Pour des pays en voie de développement où les carences en vitamine A sont courantes, la référence FAO & WHO (2004) est plus adaptée. Pour des pays développés et aux populations bien nourries et ayant accès à une alimentation variée, spécifiquement les populations nord-américaines (Etats-Unis et Canada), les recommandations de IOM (2001) sont adaptées.

I.4. Facteurs pouvant influencer la teneur en provitamine A dans les PDCO crues

La teneur en β-carotène d'une même variété de patate douce est influencée par de nombreux facteurs, tels que les conditions de culture, le climat, le type de sol, l'ensoleillement, la transformation et le stade de maturité (Yemesrach et *al*., 2021).

I.4.1. Facteurs génétiques

Les différentes variétés de patate douce ont des teneurs en provitamine A (β-carotène) variables. Les variétés à chair orange sont généralement plus riches en β-carotène comparativement aux variétés à chair blanche ou jaune (Bovell-Benjamin, 2007). La diversité génétique au sein des variétés de patate douce joue un rôle crucial dans la résilience face aux changements climatiques. Cette diversité permet de sélectionner des variétés tolérantes à des conditions de stress thermique (conditions de sécheresse dans des régions où l'eau est une ressource limitée), augmentant ainsi la résilience des systèmes agricoles tropicaux (Heider et *al.*, 2021).

I.4.2. Conditions de croissance

Les conditions de sol et de climat influencent la teneur en β-carotène. Par exemple, un sol riche en nutriments, avec un pH entre 5.5 et 6.5, et un climat chaud avec une température optimale de 24-29°C, favorisent une teneur plus élevée en β-carotène alors que des températures inférieures à ce seuil entraînent une croissance faible ou nulle (Gibrilla DUMBUYA et *al.*, 2021; Low et *al*., 2017)**.**

En effet, la PDCO est une plante d'une remarquable flexibilité climatique. Elle est largement reconnue pour sa capacité à s'adapter à une variété de conditions climatiques, ce qui en fait une culture particulièrement résiliente face aux changements climatiques. Dans les climats tropicaux et subtropicaux où les températures sont élevées et l'humidité est souvent élevée, la PDCO est bien adaptée aux conditions de chaleur et peut tolérer des températures élevées sans compromettre sa productivité (Heider et *al*., 2021). Cette plante nécessite une pluviométrie abondante et régulière, d'environ 600 mm par an. L'eau est essentielle pour le processus de photosynthèse et la régulation de la transpiration chez les plantes. Une disponibilité adéquate en eau est cruciale pour maintenir la pression de turgescence des cellules végétales et assurer un transport efficace des nutriments et des glucides au sein de la plante (Lawlor, 2002).

Un ensoleillement abondant, pour la photosynthèse, est également nécessaire pour la PDCO. Une exposition suffisante à la lumière permet aux plantes de synthétiser les glucides nécessaires à leur croissance et développement.

Pendant la saison de croissance, qui doit durer entre 4 à 5 mois sans gel, les températures doivent être suffisamment élevées pour favoriser la formation de racines tubérisées de grande taille.

Les températures diurnes et nocturnes jouent un rôle crucial dans la régulation des processus métaboliques tels que la photosynthèse et la respiration (Service, 2024).

I.4.3. Pratiques agricoles

L'application de fertilisants riches en potassium et en magnésium peut améliorer la teneur en β-carotène de la PDCO. Une irrigation adéquate, avec des niveaux d'humidité optimaux, est cruciale pour la croissance de cette culture. La PDCO peut se développer sur une grande variété de sols, allant des sols marécageux aux sols dégradés, à condition qu'ils soient riches en matières organiques, bien perméables et sans excès d'azote. Un excès de matières organiques et d'azote favorise la croissance des tiges et des feuilles au détriment des racines tubéreuses. Préférant un sol profond et riche en humus, la PDCO se développe de manière optimale sur des sols aérés de type sableux, avec un pH compris entre 5,5 et 6,5 (Lemma, 2015).

Les niveaux de nutriments dans le sol, notamment l'azote, le phosphore et le potassium, influencent la synthèse de la provitamine A. Durant la croissance, des températures adéquates favorisent également la production de ce pigment. De plus, une exposition suffisante à la lumière solaire est nécessaire pour la photosynthèse et la production de caroténoïdes. Une hydratation appropriée est essentielle, car le stress hydrique peut nuire à la synthèse du β-carotène (Nascimento et *al*., 2019). Globalement, la PDCO n'exige pas beaucoup de fertilisants ni d'autres intrants, et montre une relative résistance aux stress environnementaux.

I.4.4. Maturité à la récolte et conditions de récolte

La teneur en β-carotène augmente à mesure que les tubercules mûrissent. Par exemple, les PDCO récoltées à 120 jours après la plantation peuvent contenir un niveau maximal de β-carotène (Low et *al*., 2007). Le stade de maturité auquel les PDCO sont récoltées peut également influencer leur teneur en provitamine A. Une récolte prématurée ou trop tardive peut entraîner une variation de cette teneur. Récolter les tubercules à maturité optimale assure une teneur maximale en β-carotène. Les tubercules immatures peuvent ne pas avoir atteint leur pleine teneur en provitamine A (Hagenimana et *al.*, 2001). De plus, une manipulation délicate lors de la récolte est nécessaire pour éviter tout dommage physique susceptible d'entraîner une dégradation du β-carotène.

I.4.5. Conservation et stockage préliminaires

Pour inhiber la dégradation et permettre une bonne conservation, plusieurs techniques ont été préconisées. Certaines (traitements chimiques, blanchiment, etc.) visent à réduire la charge microbienne, d'autres à freiner les réactions d'altération biochimiques, ainsi que l'action des micro-organismes (procédés de déshydratation, tels que le séchage) (Ali et *al*., 2018). Dans certaines régions d'Afrique, les tubercules sont souvent épluchés, tranchés et séchés pour prolonger leur conservation.

La durée de conservation peut être prolongée lorsque les produits sont convenablement conditionnés avec un emballage étanche à l'eau, à l'air et aux arômes (Delia B. Rodriguez-Amaya, 1997).

Pour prévenir le stress des tubercules de PDCO après la récolte, il est essentiel de maintenir des conditions de température modérées et une bonne ventilation. Les températures extrêmes peuvent causer des dommages aux tubercules tandis qu'une ventilation adéquate empêche l'accumulation d'humidité, réduisant ainsi le risque de moisissures et de dégradation du β-carotène, un nutriment essentiel contenu dans les tubercules. Le stockage à une température modérée, autour de 15 °C, est optimal pour maintenir la qualité des tubercules et réduire les pertes dues à la germination, la transpiration, la respiration et la pourriture. De plus, une bonne ventilation est essentielle pour éviter l'accumulation d'humidité qui favorise la croissance des moisissures (Krochmal-Marczak et *al*., 2020).

Chapitre II. TECHNIQUES DE TRANSFORMATION

II.1. LA CUISSON

II.1.1. Pourquoi la cuisson des tubercules de PDCO ?

La cuisson aide à décomposer les structures cellulaires des tubercules, ce qui rend les nutriments comme la provitamine A plus accessibles pour l'absorption par le corps humain. Ainsi, les nutriments sont mieux assimilés par le système digestif.

La cuisson modifie la structure de l'amidon, le rendant plus accessible aux enzymes digestives. Cela améliore la digestibilité globale des glucides complexes présents dans les PDCO et à être utilisés comme source d'énergie par l'organisme**.** Cependant, la méthode de cuisson influence la rétention des vitamines et des minéraux. Par exemple, une étude a montré que la cuisson à la vapeur préservait mieux les antioxydants, tels que la provitamine A, par rapport à la cuisson à l'eau ou à la friture (Jiménez-Monreal et *al.*, 2009).

Les tubercules de PDCO contiennent plusieurs antinutriments susceptibles d'affecter la digestion et l'absorption des nutriments, mais une cuisson adéquate permet de réduire ces substances potentiellement indésirables.

Parmi ces antinutriments, les inhibiteurs de protéase jouent un rôle significatif. Ils diminuent l'activité des enzymes digestives telles que la trypsine, compromettant ainsi l'efficacité de la digestion des protéines. Heureusement, ces inhibiteurs sont thermolabiles et peuvent être inactivés par la chaleur.

Les oxalates, quant à eux, peuvent se lier au calcium, formant des cristaux d'oxalate de calcium, ce qui entrave l'absorption du calcium et accroît le risque de formation de calculs rénaux. Toutefois, l'ébullition réduit la teneur en oxalates dans les PDCO, une partie de ces composés se dissolvant dans l'eau de cuisson. Cette observation est confirmée par une étude de Radek & Savage (2008), qui démontre que l'ébullition diminue les niveaux d'oxalates solubles. Les phytates (acide phytique) constituent un autre antinutriment présent dans les PDCO. Ils ont la particularité de se lier aux minéraux tels que le zinc, le fer, et le calcium, réduisant ainsi leur biodisponibilité.

Heureusement, la cuisson, en particulier l'ébullition, permet de dégrader partiellement les phytates, réduisant leur capacité à inhiber l'absorption des minéraux. Hotz & Gibson (2007) ont ainsi montré que le trempage suivi de la cuisson réduit significativement les niveaux de phytates dans les aliments riches en amidon.

Enfin, en plus de neutraliser les antinutriments, une cuisson appropriée joue un rôle crucial dans la sécurité alimentaire.

Rendueles et *al.* (2011) ont démontré que la cuisson à des températures adéquates permet non seulement d'éliminer les bactéries et micro-organismes pathogènes, mais aussi de réduire les risques d'intoxications alimentaires, assurant ainsi une consommation plus sûre des aliments.

II.1.2. Facteurs affectant la teneur en provitamine A des PDCO pendant la cuisson

II.1.2.1. Méthode de cuisson

La rétention de la provitamine A (principalement le β-carotène) dans les tubercules de PDCO varie en fonction des méthodes de cuisson. Le couple durée /température de cuisson a un impact significatif sur la teneur en β-carotène des tubercules de PDCO (Bengtsson et *al.*, 2008).

a) Cuisson à l'ébullition

La cuisson des PDCO par ébullition (tableau 4) varie en fonction de divers paramètres tels que la taille des morceaux, la quantité d'eau et les conditions de température. La rétention du β-carotène est influencée par la durée de la cuisson, la dimension des morceaux et les conditions de stockage post-cuisson. Afin de maximiser la conservation de la provitamine A, il est recommandé de cuire les patates douces pendant une période relativement courte et de les stocker adéquatement après la cuisson.

Tableau 4 : Données des études faites sur la rétention du β-carotène dans les PDCO cuites à l'ébullition

Variété	**Teneur en β-C (µg/g) dans l'échantillon cru**	**Teneur en β-C après ébullition (µg/g)**	**% de rétention**	**Référence**
Resisto	155	137	83	Van Jaarsveld et *al*. (2006)
Ejumula	261.9	199.4	77.9	Bengtsson et *al*. (2008)
SPK004	116.3	90.2	70.1	Bengtsson et *al*. (2008)
Mamala (CIP420004)	-	-	83	Hagenimana et *al*. (1998)

β-C : β-carotène ; - signifie que les données ne sont pas précisées par l'auteur.

b) Cuisson à la vapeur

La cuisson à la vapeur est une méthode douce qui permet de conserver les nutriments, la texture et la couleur des PDCO. Cette méthode minimise le contact avec l'eau, réduisant ainsi la perte de vitamines hydrosolubles et de minéraux. La cuisson doit durer 10 à 20 minutes pour préserver les nutriments et la texture (tableau 5). Toutefois, une cuisson prolongée augmente le temps d'exposition à la chaleur, ce qui peut entraîner une plus grande dégradation du β-carotène.

Tableau 5: Données des études faites sur la rétention du β-carotène dans les PDCO cuites à la vapeur

Variété	**β-C dans l'échantillon cru (µg/g)**	**β-C après cuisson (µg/g)**	**Pourcentage de rétention (%)**	**Référence**
SPK004/6	314.5	249.9	84.4	Bengtsson et al. (2008)
-	-	60.50±1.27[a]	87.79±2.34	Wu et al (2008)
-	-	66.31±2.25[b]	94.81±1.09	

β-C : β-carotène ; [a] signifie que la teneur en β-carotène après 20 min de cuisson à la vapeur est exprimée en mg/kg ; [b] signifie que la teneur en β-carotène après 10 min de cuisson à la vapeur est exprimée en µg/g et -signifie que les données ne sont précisées par l'auteur.

c) Cuisson par friture

La friture des PDCO consiste à les cuire dans de l'huile chaude, leur conférant une texture croustillante à l'extérieur et moelleuse à l'intérieur, tout en intensifiant leur saveur. La friture réduit significativement la quantité de β-carotène en raison de la dégradation thermique et de l'oxydation. Des températures plus élevées (> 160°C) et des durées prolongées (> 5 minutes) entraînent une diminution significative de cette provitamine (Bengtsson et al., 2008; Lemmens et *al*., 2010)**.**

Une étude a comparé la dégradation du β-carotène dans des PDCO frits dans différentes huiles. L'huile de tournesol, riche en acides gras polyinsaturés, a montré une dégradation plus rapide du β-carotène en raison de son oxydation. L'huile d'olive, avec ses antioxydants naturels comme les polyphénols, a offert une meilleure protection, réduisant la perte de β-carotène d'environ 10% par rapport à l'huile de tournesol. L'huile de soja a montré une dégradation intermédiaire du β-carotène. Pour une meilleure rétention des nutriments, notamment le β-carotène , il est conseillé d'utiliser des huiles avec un point de fumée élevé, comme l'huile d'arachide, et des huiles riches en acides gras monoinsaturés, qui stabilisent mieux les caroténoïdes pendant la friture (Delia B. Rodriguez-Amaya, 1997; Kolawole et al., 2020).

d) Cuisson aux micro-ondes

La cuisson des PDCO aux micro-ondes est une méthode rapide et efficace pour préparer cet aliment riche en nutriments.

La rétention du β-carotène varie légèrement en fonction de la variété de PDCO et des paramètres de cuisson. Le temps de cuisson est ajusté en fonction de la taille des tubercules et de la puissance des micro-ondes. Une micro-onde plus puissante nécessitera moins de temps. Il faut noter que la cuisson rapide à haute température aide à conserver les vitamines et les minéraux, notamment les vitamines C, K et E (Lee et *al*., 2018).

II.1.2.2. Présence d'oxygène

L'exposition à l'oxygène pendant la cuisson peut augmenter l'oxydation des caroténoïdes, entraînant leur dégradation.

Des méthodes de cuisson qui limitent l'exposition à l'air, comme la cuisson sous vide ou dans des récipients fermés, peuvent améliorer la rétention de la provitamine A (Mordi et *al.*, 2020).

II.1.2.3. pH du milieu de cuisson

Les caroténoïdes sont plus stables en milieu acide. La cuisson dans un milieu légèrement acide peut aider à préserver la provitamine A dans les tubercules de PDCO. Le β-carotène est très sensible aux changements de pH, ce qui peut entraîner sa dégradation lors des processus de transformation des aliments. À des pH extrêmes (très acides ou très basiques), le β-carotène subit des dégradations significatives, réduisant ainsi sa concentration et son efficacité antioxydante (Kolawole et *al.*, 2020). L'ajout d'acides comme le jus de citron ou de vinaigre lors de la cuisson peut améliorer la rétention du β-carotène en créant un environnement acide qui stabilise cette vitamine (Musyoka et *al.*, 2018).

II.1.2.4. Prétraitement physique et chimique des tubercules

Le blanchiment, en tant que prétraitement, peut avoir un impact significatif sur la rétention de la provitamine A dans les PDCO. Le blanchiment à la vapeur est souvent préférable au blanchiment à l'eau car il réduit le contact direct des caroténoïdes avec l'eau, minimisant ainsi leur solubilisation et leur perte pendant le traitement. De plus, la vapeur permet un chauffage plus uniforme des tubercules, ce qui peut aider à préserver la structure cellulaire et à réduire la diffusion des caroténoïdes hors des cellules (Haile et *al.*, 2015).

Rappelons que le blanchiment est un traitement thermique utilisé dans le processus de transformation des aliments pour inactiver les enzymes responsables de la dégradation de la couleur, de la saveur et de la valeur nutritionnelle, tout en améliorant la texture des produits.

Cependant, ces différentes méthodes de blanchiment peuvent avoir des effets variables sur la rétention des caroténoïdes, y compris le β-carotène, dans les tubercules de PDCO.

II.1.2.5. Variété de patate douce à chair orange

Les différentes variétés de PDCO peuvent avoir des concentrations initiales variées de caroténoïdes et peuvent réagir différemment à la cuisson. Certaines variétés retiennent mieux la provitamine A après la cuisson que d'autres. Cela peut être dû à des facteurs génétiques et environnementaux (Al-Saleh et *al*., 2006).

II.1.3. La transformation de PDCO cuites en purée

Laurie et *al*. (2018) ont montré que la transformation des tubercules de PDCO en purée est une méthode efficace pour conserver et améliorer la disponibilité des nutriments essentiels, en particulier le β-carotène, tout en offrant une solution pratique pour lutter contre la carence en vitamine A dans les populations à risque. La purée de PDCO peut être utilisée de diverses manières dans la cuisine, ce qui augmente sa flexibilité d'utilisation et facilite son incorporation dans différents plats. Cela peut aider à diversifier l'alimentation et à s'assurer que les bienfaits nutritionnels des PDCO sont accessibles à une plus large population. La purée de PDCO peut partiellement substituer 20-60% de la farine de blé pour faire des pains, des beignets et des biscuits économiquement rentables et viables. Ces produits ont la couleur d'or qui facilite les campagnes de marketing pour leur promotion (Low & van Jaarsveld, 2008). De plus, la purée de PDCO est utilisée pour la formulation des aliments infantiles homogénéisés, la préparation des soupes et des chips.

Toutefois, la transformation en purée, confiture ou autres produits peut entraîner des pertes variables de β-carotène en fonction des conditions de transformation. Les procédés impliquant de hautes températures ou des temps de traitement prolongés tendent à réduire significativement la teneur en provitamine A (Bovell-Benjamin, 2007; Vimala et *al*., 2011).

II.1.3.1. La méthode de cuisson recommandée pour la purée de PDCO

Le temps de cuisson varie en fonction de la taille des morceaux, généralement entre 15 et 20 minutes, jusqu'à ce qu'ils deviennent tendres. La cuisson à la vapeur est particulièrement recommandée pour préserver les nutriments, notamment le β-carotène, de manière plus efficace que l'ébullition, tout en minimisant la dégradation thermique et l'isomérisation des caroténoïdes (Bengtsson et *al*., 2008).

La cuisson à la vapeur favorise également une texture douce et homogène, idéale pour préparer des purées, tout en préservant la saveur naturelle des PDCO, contrairement à l'ébullition, qui peut atténuer le goût en diluant les saveurs dans l'eau de cuisson. De plus, cette méthode limite les pertes de vitamines et de minéraux hydrosolubles qui se produisent lors de l'ébullition, lorsque les nutriments sont dissous dans l'eau.

En conclusion, la cuisson à la vapeur est la méthode privilégiée pour transformer les PDCO en purée. Elle optimise la conservation du β-carotène et des autres nutriments essentiels tout en maintenant la texture et la saveur du tubercule. Cette approche offre ainsi un équilibre optimal entre la préservation nutritionnelle et la qualité culinaire.

II.1.3.2. Purée de PDCO : technique de conservation

a) Réfrigération

La réfrigération de la purée de PDCO permet de ralentir la croissance microbienne et de conserver les qualités nutritionnelles et sensorielles du produit. Lors d'une étude de Musyoko et *al.* (2018), il a été constaté que l'utilisation de conservateurs chimiques combinés à l'acidification pouvait inhiber efficacement les microorganismes pathogènes et de détérioration pendant le stockage réfrigéré. La purée de PDCO doit être conservée à une température de 4 °C pour ralentir la croissance microbienne et les réactions enzymatiques. À cette température, la durée de conservation peut aller jusqu'à une semaine.

b) Congélation

Pour une conservation à long terme, la purée doit être congelée à -18 °C. Cette méthode peut prolonger la durée de conservation jusqu'à plusieurs mois. La congélation inhibe la croissance des micro-organismes et réduit les réactions chimiques, conservant ainsi la qualité nutritionnelle et sensorielle de la purée. De plus, les pertes de β-carotène sont minimisées lors de la congélation, ce qui est crucial pour maintenir la valeur nutritionnelle de la purée (Bengtsson et *al*., 2008).

c) Conservation sous vide

La purée est placée dans des sacs en polyéthylène ou en polypropylène, puis l'air est évacué avant de sceller hermétiquement. La conservation sous vide réduit l'exposition à l'oxygène, ce qui diminue le risque d'oxydation du β-carotène et d'autres nutriments. De plus, cette méthode limite la croissance microbienne en absence d'air, prolongeant ainsi la durée de conservation sans recourir à des additifs chimiques (Bengtsson et *al*., 2008).

d) Réchauffage

Si la purée a été conservée au réfrigérateur ou au congélateur, elle peut être réchauffée à feu doux sur la cuisinière ou au micro-ondes avant d'être servie (Bengtsson et *al.*, 2008).

II.1.3.3. Choix de l'emballage

A. Matériaux d'emballage

- **Polyéthylène haute densité (PEHD) :** Ce matériau est couramment utilisé pour les emballages alimentaires en raison de ses bonnes propriétés barrières contre l'humidité et l'oxygène. Il est également résistant à la perforation et au déchirement, ce qui le rend idéal pour l'emballage de purée.
- **Polypropylène (PP) :** Le polypropylène est une autre option d'emballage qui offre une excellente résistance chimique et une bonne barrière à l'humidité, ce qui aide à prolonger la durée de conservation du produit.
- **Emballages sous vide :** L'utilisation de sacs sous vide en polyéthylène ou en polypropylène peut significativement prolonger la durée de conservation en éliminant l'air, ce qui réduit l'oxydation et la croissance microbienne.

B. Caractéristiques requises

- **Barrière à l'oxygène :** Les emballages doivent minimiser l'exposition à l'oxygène pour prévenir l'oxydation des nutriments, en particulier du β-carotène, qui est sensible à l'oxydation.
- **Barrière à l'humidité :** La purée doit être protégée de la perte d'humidité pour éviter la dessiccation et maintenir une texture optimale.

- **Résistance mécanique :** Les emballages doivent être suffisamment robustes pour résister aux manipulations et au transport sans ne se déchirer ni se perforer.

II.2. LE SECHAGE

II.2.1. Pourquoi le séchage des tubercules de PDCO ?

Le séchage permet la conservation en saison sèche et donc permet de consommer la PDCO à travers toute l'année où la culture est saisonnière. Toutefois, la stabilité de la provitamine A est affectée différemment selon la méthode et les conditions de séchage appliquées.

Le séchage des tubercules de PDCO à des températures contrôlées permet de conserver une grande partie des caroténoïdes, notamment le β-carotène, qui est un précurseur de la vitamine A. En éliminant l'eau, le séchage réduit le poids des tubercules tout en préservant leurs nutriments essentiels et cela permet une meilleure conservation et une réduction du volume pour le stockage et le transport sans affecter de manière significative la valeur nutritionnelle.

Il faut noter que le séchage réduit l'activité de l'eau dans les tubercules, ralentissant ainsi la croissance microbienne et prolongeant leur durée de conservation. Des tubercules séchés conservent mieux leurs nutriments essentiels pendant le stockage par rapport aux tubercules frais, qui sont sujets à une détérioration rapide.

Enfin, le séchage des tubercules permet de réduire les pertes post-récolte en préservant la qualité nutritionnelle des produits agricoles. Cela contribue à la sécurité alimentaire en assurant une disponibilité continue de nutriments importants tout au long de l'année.

II.2.2. Facteurs affectant la teneur en provitamine A des PDCO pendant le séchage

a) Température de séchage

Les caroténoïdes, dont la provitamine A, sont sensibles à la chaleur. Des températures de séchage élevées peuvent accélérer leur dégradation. Selon la recherche de Bengtsson et *al*. (2008), des températures supérieures à 60°C peuvent entraîner une perte significative de β-carotène.

b) Durée de séchage

Un temps de séchage prolongé, surtout à haute température, peut augmenter les pertes de provitamine A. Selon l'étude de DEJIAN HUANG (2005), des durées de séchage plus courtes à des températures modérées sont préférables pour conserver les caroténoïdes.

Cependant, il est important de noter qu'une durée de séchage prolongée, même à des températures modérées, peut entraîner une exposition prolongée à l'oxygène. Cette exposition accrue à l'oxygène peut induire l'oxydation et la dégradation des caroténoïdes. Van Jaarsveld et *al*. (2006) ont démontré que des durées de séchage prolongées augmentent la perte de β-carotène en raison de l'exposition prolongée à l'oxygène et à la chaleur.

c) Exposition à la lumière

Les caroténoïdes provitaminiques A, comme le β-carotène, sont sensibles à la dégradation photo-oxydative lorsqu'ils sont exposés à la lumière, particulièrement la lumière UV. Cette sensibilité est due à la capacité des rayons UV à générer des espèces réactives de l'oxygène (ROS), telles que l'oxygène singulet et les radicaux hydroxyles, qui peuvent provoquer la dégradation des caroténoïdes (Sandmann, 2019). Cette dégradation photo-oxydative se produit principalement par des réactions de peroxydation des lipides, où les doubles liaisons des caroténoïdes réagissent avec les radicaux libres produits par l'exposition à la lumière. Ces réactions produisent des produits de peroxydation des lipides et des dérivés réactifs d'oxygène, qui peuvent endommager les structures des caroténoïdes et entraîner leur dégradation, par exemple une perte de 25% de la teneur en β-carotène a été observée suite à l'exposition à la lumière UV (Stahl & Sies, 2005).

Pour réduire ces pertes, Chen et al.(1995) recommandent de sécher les tubercules de PDCO dans des conditions à l'abri de la lumière directe pour minimiser cette perte. Par exemple, le séchage à l'ombre ou dans l'obscurité préserve mieux les caroténoïdes par rapport au séchage en plein soleil.

d) Teneur en humidité

La teneur en humidité initiale des tubercules de PDCO influence considérablement la vitesse de séchage et la rétention de la provitamine A, notamment le β-carotène.

Un taux d'humidité élevé peut ralentir le séchage, augmentant le risque de dégradation enzymatique et la croissance microbienne. Des tubercules à haute teneur en humidité nécessitent un séchage plus long, augmentant ainsi la perte de caroténoïdes (Muhammad Tayyab Rashid, 2022).

Il faut éviter d'une part la dessiccation et d'autre part la pourriture causée par une humidité trop élevée de l'air qui environne les tubercules. La teneur en eau est le principal facteur de variation de la densité énergétique et de la teneur en nutriments des tubercules. Si les tubercules sont stockés à une température élevée et selon une méthode étanche à l'air, le manque d'oxygène fait par exemple noircir le cœur des patates douces. Plus la température du produit est élevée, plus l'aération est nécessaire.

Pour l'industrie alimentaire, le concept d'activité de l'eau est l'une des propriétés les plus importantes du traitement, de la conservation et le stockage des aliments.

e) Prétraitements physique et chimique

Les méthodes de prétraitement comme le blanchiment à 90°C pendant 3 minutes et à une température de séchage de 70°C (Orjiakor et *al.*, 2022) et le trempage pendant 20 minutes dans une solution saline à 1 % ou une solution d'acide citrique à 0,5 % (Haile et al., 2015) avant le séchage réduisent l'activité des enzymes responsables de la dégradation de la provitamine A, augmentant ainsi leur rétention.

- Le **blanchiment** inactive les enzymes responsables de la dégradation du β-carotène, telles que les peroxydases et les lipoxygénases, les enzymes pouvant provoquer la perte de β-carotène en raison de réactions oxydatives (Muhammad Tayyab Rashid, 2022; Owade et al., 2018).

- Le **traitement à l'acide citrique et au sel :** Le traitement à l'acide citrique aide à stabiliser le pH, ce qui inhibe l'oxydation et protège les caroténoïdes provitaminiques A pendant le séchage. L'ajout du sel abaisse l'activité de l'eau par effet osmotique et réduit l'oxydation des enzymes (peroxydase et lipoxygénase) qui favorisent l'oxydation de la provitamine A (Muhammad Tayyab Rashid, 2022).

f) Méthode de séchage

La méthode de séchage (à l'air libre, au soleil, à l'air chaud, à l'étuve, aux micro-ondes et par lyophilisation) influence également la rétention de la provitamine A (β-carotène).

Les méthodes utilisant des températures basses et protégées de la lumière sont préférables. Les études menées par Muhammad Tayyab Rashid (2022) ont montré que la lyophilisation, bien que coûteuse, est souvent la méthode la plus efficace pour préserver les niveaux de β-carotène.

Avec un temps de séchage plus court, le séchage au micro-ondes a aussi montré une meilleure rétention des nutriments au moment où les fortes pertes en nutriments dont le β-carotène sont observées avec le séchage au soleil (Vimala et *al*., 2011).

g) Maturité du tubercule

Les tubercules récoltés à maturité optimale présentent une meilleure rétention du β-carotène pendant le séchage que ceux récoltés à un stade immature. Cela est attribuable à la structure cellulaire plus robuste et à la présence accrue de composés antioxydants dans les tubercules plus mûrs, qui protègent les caroténoïdes contre la dégradation. Des recherches de Kimura et *al.* (2007) ont démontré que le contenu initial en β-carotène et la stabilité pendant le stockage et le traitement sont directement corrélés à la maturité des tubercules au moment de la récolte.

h) Taille des tranches et surface d'exposition

Plus les morceaux ou tranches sont petits, plus la surface exposée à l'air est grande. Cela peut entraîner une dégradation plus rapide du β-carotène en raison de l'oxydation (Bengtsson et *al*., 2008). Les morceaux plus gros ont une surface d'exposition relative plus petite, ce qui peut aider à préserver la teneur en provitamine A.

Des tranches plus fines peuvent être plus sensibles à des températures élevées parce qu'elles atteignent la température ambiante plus rapidement que les morceaux plus gros. Des morceaux plus petits sèchent plus rapidement, ce qui peut réduire le temps pendant lequel le β-carotène est exposé à des conditions de dégradation (comme l'air et la lumière).

Cependant, un séchage trop rapide peut également entraîner une perte plus importante de nutriments si la température est trop élevée ou si l'humidité n'est pas contrôlée correctement. Ainsi, la taille des morceaux ou des tranches de PDCO affecte la surface exposée à la chaleur et à l'oxygène, influençant ainsi la dégradation des caroténoïdes.

Les études menées par Omodamiro et *al*. (2022) et Shahid Riaz Rajoka et *al*. (2022) ont montré que des tranches de 3 à 5 mm d'épaisseur sont souvent recommandées pour un séchage optimal, car elles permettent un bon compromis entre le temps de séchage et la préservation des nutriments. Des tranches trop épaisses peuvent sécher de manière inégale, ce qui peut entraîner une croissance microbienne et une dégradation des nutriments à l'intérieur des morceaux qui ne sont pas complètement secs.

i) Atmosphère de séchage

La composition de l'atmosphère pendant le séchage, notamment la présence d'oxygène, peut accélérer l'oxydation des caroténoïdes provitaminiques A. La recherche de Liu et *al*. (2014) suggère que le séchage dans une atmosphère contrôlée, pauvre en oxygène, peut mieux préserver le β-carotène.

L'utilisation de techniques telles que le remplissage à chaud, l'emballage imperméable à l'oxygène, ou l'utilisation d'une atmosphère inerte (comme le conditionnement sous vide ou sous atmosphère modifiée) peut protéger les caroténoïdes contre l'oxydation (Delia B. Rodriguez-Amaya, 1997).

II.2.3. Influence des méthodes de séchage sur la capacité de réhydratation des farines

La réhydratation vise à restaurer les propriétés du produit brut. La capacité de réhydratation (CR) de la farine dépend fortement de la méthode de séchage utilisée et d'autres paramètres tels que la durée de réhydratation, la composition du produit et la température de l'eau (Muhammad Tayyab Rashid, 2022). Chacune de ces méthodes influence différemment la cinétique de séchage, les qualités physico-chimiques et la structure de la farine, ce qui à son tour affecte la réhydratation (Zhang et *al.*, 2023).

La CR de la farine de PDCO est une mesure critique de ses propriétés fonctionnelles, qui affectent son utilisation dans diverses applications alimentaires.

La solubilité dans l'eau et la capacité de gélatinisation sont essentielles pour déterminer comment la farine de PDCO se comporte dans les formulations alimentaires.

Il faut noter qu'une bonne CR signifie que la farine peut absorber l'eau efficacement, ce qui est essentiel pour l'utilisation dans les soupes, les purées, et d'autres produits alimentaires instantanés (Korese et *al*., 2021).

II.2.4. Conditionnement et emballage des farines de PDCO

Pour assurer une capacité de réhydratation élevée et une humidité résiduelle tolérable dans les farines de PDCO, il est essentiel de mettre en place des stratégies de conditionnement et d'emballage adéquates.

II.2.4.1. Conditionnement

a) **Température et humidité contrôlées** : Pour préserver le β-carotène, il est crucial de stocker les farines de PDCO à des températures basses et à une humidité relative contrôlée. Selon Reyes & Cisneros-Zevallos (2007), les produits riches en caroténoïdes doivent être conservés à une température de 4°C pour réduire la dégradation des nutriments.
b) **Atmosphère modifiée** : L'utilisation d'une atmosphère modifiée, en réduisant la teneur en oxygène et en augmentant celle en azote est recommandé pour protéger le β-carotène contre l'oxydation et peut prolonger la durée de conservation.

Van Hal (2000) et Vimala et *al* (2011) ont démontré que l'emballage sous atmosphère modifiée améliore la rétention des caroténoïdes dans les produits alimentaires.

II.2.4.2. Emballage

L'emballage adéquat est essentiel pour protéger la farine de PDCO contre l'humidité, l'oxygène, et la lumière, tous facteurs qui peuvent altérer la qualité du produit, en particulier le β-carotène.

a) **Matériaux barrières** : L'emballage doit utiliser des matériaux avec de bonnes propriétés barrières contre l'humidité et l'oxygène. Les films en aluminium ou les emballages multicouches (polyéthylène, polypropylène avec une couche barrière d'aluminium ou d'oxydes métalliques) sont idéaux.
b) **Protection contre la lumière** : Le β-carotène est photosensible, donc l'emballage doit être opaque ou avoir une protection contre les rayons UV pour prévenir sa dégradation.
c) **Scellage hermétique** : Un scellage hermétique est essentiel pour éviter l'entrée d'humidité et d'oxygène qui peuvent réduire la qualité de la farine. Ceci est particulièrement important pour maintenir une faible humidité résiduelle et empêcher la croissance microbienne.

II.3. MECANISMES DE DEGRADATION DU β-CAROTENE

Les mécanismes de dégradation du β-carotène (thermolyse, oxydation, isomérisation) sont valables pour la plupart des transformations impliquant chaleur, lumière et oxygène, bien que leur intensité et leurs effets puissent varier selon les conditions spécifiques.

- **Thermolyse** : La chaleur élevée (friture, cuisson, séchage à haute température) provoque la rupture des doubles liaisons conjuguées dans la molécule de β-carotène , entraînant une perte de son activité biologique (Lemmens et *al*., 2010).
- **Oxydation** : Ce mécanisme est amplifié par la lumière (photo-oxydation) et la présence d'oxygène. Il se produit aussi bien pendant la friture, le séchage, que lors du stockage dans des conditions lumineuses ou oxydantes. L'oxygène réagit avec les doubles liaisons du β-carotène, formant des époxydes et d'autres produits oxydés, qui sont biologiquement inactifs et peuvent réduire la qualité nutritionnelle (Henry et *al*., 1998).
- **Isomérisation** : Ce phénomène survient principalement sous l'effet de la chaleur, mais peut être exacerbé par la lumière. La chaleur peut provoquer une isomérisation du β-carotène de la forme trans (bioactive) à la forme cis (moins bioactive), réduisant ainsi l'efficacité de conversion en vitamine A (Hiranvarachat et *al*., 2008).

Chapitre III. MATERIELS ET METHODES

III.1. Matériel végétal d'étude

Les échantillons de tubercules de PDCO de la variété « NASPOT 12 » faisant l'objet de notre étude, ont été récoltés à l'ISABU dans la région naturelle de Kirimiro, située dans la province de Mwaro au Burundi. Dix kilogrammes de racines tubéreuses ont été récoltées, placées dans une boite à carton et transportés au Laboratoire du Centre d'Excellence régional en sciences de la nutrition (EANSI) au campus Mutanga de l'Université du Burundi. Les PDCO exemptes de blessures ou de pourriture ont été utilisées pour la transformation. Une fraction de ces tubercules, après le séchage, est transformée en farines, tandis qu'une autre portion est soumise à diverses méthodes de cuisson. Enfin, les teneurs en β-carotène dans les échantillons de PDCO crus, cuits et séchés ainsi que la capacité de réhydratation des farines ont été évalués au Laboratoire biochimique de l'EANSI.

III.2. Produits chimiques

Tous les solvants utilisés pour l'analyse du β-carotène sont de qualité HPLC. Les solvants utilisés étaient l'hexane, acétone, éthanol, toluène, acétonitrile, méthanol, acétate d'éthyle et l'eau distillée. Un standard de β-carotène pur à 95%, de qualité analytique et importé de la Chine, a été utilisé pour calibrer et quantifier le β-carotène dans les échantillons.

III.3. Préparation, prétraitement et transformation des PDCO

III.3.1. Cuisson

Cinq kilogrammes de tubercules de PDCO sains, sans signes de pourriture ont été lavés soigneusement avec de l'eau du robinet propre et ont été divisés en neuf lots égaux. Les tubercules de PDCO ont été blanchis à la vapeur pendant 3 minutes à 90 °C (Orjiakor et al., 2022). Ensuite, nous les avons trempés dans une solution saline de 1% dans laquelle un jus de citron vert à 0,5% a été ajouté (Muhammad Tayyab Rashid, 2022). Les échantillons de PDCO ont été préparés comme des produits prêts à consommer et après chaque méthode de cuisson, la teneur en β-carotène (µg/g) a été calculée et enregistrée selon les méthodes développées par FAO & WHO (1998) et Kimura et *al.(*2007).

Les échantillons ont été divisés en deux groupes : avec pelures et sans pelures. Parmi les échantillons sans pelures, l'un a été cuit à la vapeur, un autre aux micro-ondes, un troisième bouilli, et deux ont été frits séparément (l'un avec de l'huile de palme raffinée, l'autre avec de l'huile de tournesol). Le groupe des échantillons avec pelures comprend un lot rôti au four, un autre grillé, et un cuit dans des cendres chaudes. Enfin, un échantillon, laissé cru, a servi de témoin.

- **Ébullition** : 500g de PDCO ont été immergées dans 250mL d'eau bouillante contenue dans un pot en aluminium muni d'un couvercle. L'ébullition a duré 20 minutes à 100°C.
- **Friture** : les tubercules de PDCO ont été pelés puis coupés en petites tranches. Une portion de 500g de ces tranches de PDCO a été immergée dans de l'huile de tournesol à une température de 160°C pendant 4 minutes. Une autre portion de PDCO d'égale quantité a été frite dans les mêmes conditions avec l'huile de palme raffinée. Ces huiles sont achetées au marché local.
- **Rôtissage** : 500g de tubercules entiers non épluchés ont été rôtis à une température de 150°C dans un four pendant 30 min. A mi-cuisson, les échantillons ont été retournés pour éviter d'être brûlés sur les côtés.
- **Grillade** : 500g de PDCO ont été cuites avec leur peau pendant 20 minutes. Avec un feu moyen, les tubercules de PDCO ont été retournés régulièrement pour assurer une cuisson complète de l'aliment tout en évitant des températures extrêmes qui pourraient dégrader le β-carotène.
- **Cuisson en cendre** : trois tubercules (500g) de PDCO sont enfouis sous des cendres chaudes. Après 15 minutes que les PDCO sont enveloppées dans les cendres chaudes avec une chaleur indirecte et douce, sous des températures plus modérées, nous les avons percées avec une fourchette pour vérifier si elles sont tendres, signe que la cuisson a terminé.
- **Cuisson aux micro-ondes** : nous avons d'abord percé la peau des PDCO (non épluchées) à plusieurs endroits avec une fourchette pour permettre à la vapeur de s'échapper pendant la cuisson. Les patates douces (500g) ont été placées sur une assiette des micro-ondes (700 W) pendant 6 minutes.
- **Cuisson à la vapeur** : les tubercules pelés (500g) ont été disposés dans un panier vapeur en métal. Celui-ci était placé à l'intérieur de la casserole sans toucher l'eau. Cette casserole était remplie d'eau (à porter à l'ébullition) avec 2 à 3 cm de profondeur.

Pour emprisonner la vapeur, la casserole était couverte avec un couvercle hermétique et c'est cette vapeur qui cuisait les patates douces. Le temps de cuisson était de 15 minutes suivant la taille des morceaux de PDCO.

III.3.2. Séchage

Après le triage pour obtenir des PDCO non endommagées, elles ont été lavées à l'eau courante propre pour enlever toute saleté. Les tubercules ont été épluchés manuellement, coupés en tranches de petites dimensions à l'aide d'un coteau de cuisine en inox. Les tubercules de PDCO frais (variété NASPOT 12) ont été blanchis à la vapeur pendant 3minutes. Ensuite, ils ont été trempés dans une solution saline de 1% et 0,5% d'acide citrique pendant 10 minutes et enfin divisés en six portions de 500g chacune, avant l'opération de déshydratation.

Une portion des tubercules crus de PDCO a servi de référence et les cinq restantes ont été utilisées comme suit :

- **Séchage à l'air libre :** dans un endroit bien ventilé, à l'abri de la lumière directe du soleil pour éviter la dégradation du β-carotène par les UV, les morceaux de PDCO ont été étalés sur des grilles. Le séchage pendant cinq jours, à une température ambiante modérée (20-30°C), a été conduit pour éviter une dégradation thermique du β-carotène.
- **Séchage aux micro-ondes :** les tranches de PDCO ont été disposées sur un plateau adapté pour les micro-ondes. Une puissance de 200W des micro-ondes a été réglée après avoir vérifié que ces tranches de PDCO ne se chevauchent pas pour permettre un séchage uniforme. Pour éviter la dégradation thermique du β-carotène, une température interne de 60°C a été maintenue pendant trois heures.

  Notons qu'une puissance plus élevée peut réduire le temps de séchage, mais une puissance modérée est souvent recommandée pour un séchage plus doux et une meilleure préservation des nutriments.

- **Séchage au soleil direct :** les morceaux de PDCO ont été étalés en une seule couche sur un sheeting pour permettre une bonne circulation de l'air. Le séchage a été conduit à une température ambiante pendant trois jours.

- **Séchage au soleil indirect :** dans une structure spécialement conçue pour capter et utiliser l'énergie solaire de manière contrôlée (séchoir solaire), les tranches de PDCO ont été placées à l'intérieur où la chaleur solaire est emprisonnée. Ainsi, le séchage est plus uniforme et protégé des intempéries, des contaminants (poussières, insectes) et de l'humidité nocturne. Il faut noter que le séchoir solaire est une méthode optimisée et hygiénique car il permet de maintenir une température constante et relativement élevée, ce qui optimise la déshydratation tout en minimisant les pertes de nutriments sensibles à la chaleur, comme le β-carotène.
- **Séchage en étuve :** les tranches de PDCO ont été placées sur les plateaux de l'étuve en une seule couche. Nous avons réglé l'étuve à une température optimale de 60°C pendant un temps de séchage d'environ huit heures.

III.4. Préparation de la solution étalon

III.4.1. Préparation de la solution étalon mère

L'étalon a été préparé en utilisant la forme en poudre du standard de β-carotène 95% importé de la Chine. Pour la préparation de la solution étalon mère (10mg/100 mL), nous avons pesé 10,52 mg de β-carotène selon la formule ci-dessous et puis cette masse a été dissoute dans 100mL du mélange de solvants composé de 50% d'hexane, 25% d'acétone, 15% d'éthanol et 10% de toluène.

$$\text{Masse requise de poudre (mg)} = \frac{\text{Concentration cible (mg)}}{\text{Pureté (fraction)}} \quad \textbf{(1)}$$

III.4.2. Préparation des solutions étalons filles

Des solutions étalons filles (8mg/100mL, 6mg/100mL, 4mg/100mL et 2mg/100mL) ont été préparées à partir de la solution étalon mère par dilution avec le mélange de solvants utilisé pour la préparation de la solution étalon mère.

Le but était d'obtenir une série de concentrations avec des absorbances correspondantes qui serviront à tracer la courbe d'étalonnage.

Pour protéger le β-carotène de la lumière, surtout des rayons UV, et maintenir sa pureté et sa concentration, il est crucial de le conserver à l'abri de la lumière, à basse température (réfrigération à 4°C) et sous une atmosphère inerte comme l'azote ou l'argon. Un flacon en verre ambré avec un bouchon étanche est idéal pour filtrer la lumière et éviter l'oxydation.

III.5. Traçage de la courbe d'étalonnage

L'absorbance de la solution étalon mère et de chaque solution fille a été mesurée à la longueur d'onde de 450nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible.

Les concentrations des solutions sur l'axe des abscisses (X) et les valeurs de l'absorbance mesurée sur l'axe des ordonnées (Y), nous avons tracé un graphique à l'aide du logiciel Excel qui nous a donné l'équation de la droite d'étalonnage (**A=k×C+b**) où **A** est l'absorbance, **C** est la concentration, **k** est la pente et **b** est l'ordonnée à l'origine. Ainsi, une courbe d'étalonnage en cinq points pour le β-carotène a été tracée et elle était linéaire.

III.6. Extraction du β-carotène

Le lycopène présentant des maxima d'absorption à 470 nm, la lutéine autour de 445 nm, zéaxanthine à 449 nm et l'α-carotène à 445 nm sont des caroténoïdes liposolubles, tout comme le β-carotène et peuvent absorber à 450 nm (Delia B. Rodriguez-Amaya and Mieko Kimura, 2004). Toutefois, il n'existe pas de solvant d'extraction utilisé qui puisse isoler exclusivement le β-carotène sans extraire les autres caroténoïdes liposolubles. Pour différencier ces caroténoïdes, la combinaison du temps de rétention et du spectre d'absorption permet une identification fiable du β-carotène dans un mélange complexe de caroténoïdes. Une extraction efficace des composés lipophiles comme le β-carotène, nous avons utilisé un mélange de solvants composé de 50 % d'hexane, 25 % d'acétone, 15 % d'éthanol et 10 % de toluène (Lemmens et *al*., 2010). L'hexane et l'acétone ont été choisis pour leur capacité à solubiliser les caroténoïdes lipophiles. L'ajout d'éthanol améliore l'extraction en augmentant la polarité du mélange, ce qui facilite la libération des caroténoïdes liés aux protéines et d'autres composants de la matrice cellulaire. Le toluène, pour sa part, agit comme un co-solvant lipophile qui optimise la solubilisation des caroténoïdes et renforce la pénétration dans la matrice de l'échantillon. Pour éviter l'oxydation du β-carotène durant l'extraction, nous avons ajouté le butylhydroxytoluène (BHT), un antioxydant (Delia B. Rodriguez-Amaya, 2001).

Les étapes typiques comprennent :

- Broyage de l'échantillon ;
- Ajout du solvant pour dissoudre le β-carotène ;
- Filtration ou centrifugation pour séparer le β-carotène (phase organique) dissous du reste de la matière.

La 1ère étape est essentielle pour maximiser la surface de contact entre le solvant et le β-carotène et elle permet d'exposer plus de cellules végétales à l'action du solvant. La troisième étape aide à éliminer les particules solides et ainsi améliorer la pureté du β-carotène extrait. L'extrait a été concentré par évaporation du solvant à l'évaporateur rotatif, puis le résidu sec a été redissout dans l'hexane. Les échantillons séchés ont été réhydratés avec 10 mL d'eau distillée pendant 15 minutes avant l'extraction.

III.7. Séparation du β-carotène des autres caroténoïdes liposolubles

Une fois l'extraction effectuée, la séparation des molécules (y compris le β-carotène) a lieu lors de l'analyse HPLC en utilisant une colonne C18 et une phase mobile composée d'acétonitrile : méthanol : acétate d'éthyle (60:20:20) à un débit de 0,5 ml/min.

III.8. Détermination du nombre d'extraits

Pour maximiser le rendement et comparer la teneur en β-carotène des échantillons de PDCO (frais, cuits et séchés), 5g pour chaque échantillon a été prélevé et dissout dans 100 mL du mélange de solvants utilisé pour la préparation de la solution étalon et l'extraction séquentielle (4 extractions) a été faite (Delia B. Rodriguez-Amaya and Mieko Kimura, 2004). Après chaque extraction accompagnée, l'absorbance de β-carotène extrait a été mesurée à l'aide d'un détecteur UV-Vis du HPLC réglé à 450 nm. Après centrifugation, le résidu solide a été remis dans le mélangeur et réextrait avec du solvant frais. Nous avons répété l'extraction et la filtration jusqu'à ce que le résidu soit incolore et chaque extraction durait 30 minutes (Delia B. Rodriguez-Amaya and Mieko Kimura, 2004).

III.9. Mesure de l'absorbance

A l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible, l'absorbance pour les solutions étalons mère et filles a été lue à une longueur d'onde d'absorption maximale de 450 nm (Delia B. Rodriguez-Amaya and Mieko Kimura, 2004) et pour les échantillons de PDCO, l'absorbance du β-carotène à 450 nm est directement mesurée par le détecteur UV-Visible intégré à l'appareil HPLC.

III.10. Calcul de la teneur en β-carotène

Dans les échantillons crus, cuits et séchés de PDCO, les teneurs en β-carotène ont été calculées à partir des concentrations. La droite d'étalonnage trouvée au point III.5 nous a permis de déterminer ces concentrations à partir des absorbances mesurées comme le stipule la loi de Beer-Lambert.

La droite d'étalonnage de forme ci- dessous est obtenue à partir du standard : $A=k.C+b$ **(2)**

Où :

- **A** représente l'absorbance mesurée ;
- **C** est la concentration de β-carotène en µg/mL ;
- **k** est la pente de la courbe d'étalonnage (coefficient directeur de la droite) ;
- **b** est l'ordonnée à l'origine.

Alors, la concentration (**C**) peut être trouvée par

$$\mathbf{C}\ (\mu g/mL) = \frac{A-b}{k}\ \textbf{(3)}$$

Et la masse de β-carotène (µg) = C× volume extrait (mL) **(4)**

Signalons que la masse totale de β-carotène est la somme des masses de chaque extraction comme le montre le tableau 6.

Tableau 6 : Formules pour calculer la teneur du β-carotène en µg dans 1g de l'échantillon

Extrait N°	**Absorbance (A)**	**Conc. déduite (µg/mL)**	**V.E (mL)**	**Masse de β-C (µg)**	**Masse cumulée (µg)**	**Teneur en µg/g**
1	A_1	C_1= (A1-b)/k	100	C_1×100	M_1	
2	A_2	C_2= (A2-b)/k	100	C_2×100	M_1+M_2	
3	A_3	C_3= (A3-b)/k	100	C_3×100	$M_1+M_2+M_3$	
4	A_4	C_4= (A4-b)/k	100	C_4×100	$M_1+M_2+M_3+M_4$	$(M_1+M_2+M_3+M_4)/P$

A : absorbance lue ; Conc. : Concentration ; β-C : β-carotène ; M : masse ; P : poids de l'échantillon ; V.E : volume extrait.

La conversion en µg/g pour chaque échantillon a été trouvée à partir de la formule ci-après :

$$\text{Teneur en β-carotène (µg/g)} = \frac{\text{Masse totale (µg)}}{\text{Poids de l'échantillonen (g)}} \quad \textbf{(5)}$$

III.11. Calcul de la rétention du β-carotène

Selon Fabiana De Moura (2013) , van Jaarsveld et *al* (2006), Kourouma et *al* (2019) et Delia B. Rodriguez-Amaya (1997), le pourcentage de rétention apparente (RA) et celui de rétention réelle (RR) de β-carotène sont calculés sur base des formules ci-après:

$$\text{RA (\%)} = \frac{\text{Teneur en } \boldsymbol{\beta-\text{carotène}} \text{ par g d'aliment transformé}}{\text{Teneur en } \boldsymbol{\beta-\text{carotène}} \text{ par g d'aliment cru}} \times 100 \quad \textbf{(6)}$$

$$\text{RR (\%)} = \frac{\text{Teneur en } \boldsymbol{\beta-\text{carotène}} \text{ par g d'aliment transformé} \times \text{g d'aliments après cuisson (ou séchage)}}{\text{Teneur en } \beta-\boldsymbol{\text{carotène}} \text{ par g d'aliment cru} \times \text{g d'aliments avant cuisson (ou séchage)}} \times 100 \quad (\mathbf{7})$$

Il faut noter que la rétention réelle est la méthode recommandée pour calculer la rétention des nutriments (Delia B. Rodriguez-Amaya, 1997).

III.12. Calcul de la capacité de réhydratation

Pour calculer la CR de la farine de PDCO déshydratées, il est nécessaire de suivre une procédure standardisée qui consiste à mesurer la quantité d'eau absorbée par une quantité définie de farine après une période de trempage. Ainsi, pour chaque catégorie de farine de PDCO, 3g sont pesés et sont placés dans un bécher contenant 50 ml d'eau distillée à température ambiante.

On laisse tremper pendant une période 60 minutes tout en agitant doucement de temps en temps pour éviter les grumeaux. Après la période de trempage, le mélange est filtré pour enlever l'excès d'eau.

Un papier filtre est utilisé pour recueillir la farine réhydratée. Nous avons enfin pesé la farine réhydratée après l'avoir égouttée. Selon Lewicki (1998), la formule pour calculer la capacité de réhydratation (CR) est la suivante :

$$\mathbf{CR=}\frac{\text{Poids de l'eau absorbée}}{\text{Poids de l'échantillon sec}}=\frac{\text{Poids de l'échantillon rehydraté}-\text{Poids de l'échantillon sec}}{\text{Poids de l'échantillon sec}} \quad \mathbf{(8)}$$

III.13. Traitement des résultats

La droite d'étalonnage du β-carotène pur à 95 % a été tracée à l'aide du logiciel Excel. On insère un graphique de type nuage de points (Scatter Plot) pour représenter y (absorbances) en fonction de x (concentrations) et on ajoute une courbe de tendance linéaire sur le graphique. Ensuite, on coche l'option afficher l'équation sur le graphique et afficher le coefficient de détermination R^2. Les données ont été saisies et analysées à l'aide du logiciel Excel, et les résultats sont présentés sous forme de tableaux, de graphiques et de textes. Pour examiner l'existence d'une relation linéaire entre la rétention du β-carotène après le séchage et la capacité de réhydratation des farines obtenues, une analyse de corrélation de Pearson a été réalisée. Ainsi, le coefficient de corrélation de Pearson *r* a été calculé à l'aide du logiciel Excel**.**

Chapitre IV. RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Présentation des résultats

Les teneurs en β-carotène dans un échantillon de PDCO crus, huit échantillons de PDCO cuits et cinq séchés sont présentés respectivement dans les tableaux 8, 9 et 12. Les pourcentages de rétention réelle du β-carotène dans les PDCO après cuisson et séchage sont présentés dans les tableaux 11 et 13 respectivement. Les pourcentages de couverture en vitamine A pour 100g de PDCO consommées après cuisson sont présentés dans le tableau 10. Les valeurs de capacité de réhydratation des farines obtenues après les différentes méthodes de séchage sont présentées dans le tableau 14 et la relation entre la rétention du β-carotène après le séchage et la capacité de réhydratation des farines obtenues est présentée dans le tableau 15. Ces teneurs sont obtenues à l'aide de la droite d'étalonnage de la figure 3. Rappelons que la droite d'étalonnage a été obtenue à l'aide des concentrations de solutions étalons filles, qui à leur tour étaient obtenues à partir de la concentration de la solution étalon mère avec leurs absorbances respectives.

IV. 1.1. Droite d'étalonnage

En vue de tracer la courbe d'étalonnage reprise dans la figure 3, des solutions étalons (filles) ont été préparées à partir de la solution étalon mère. Le tableau 7 montre les absorbances de ces solutions en fonction de leurs concentrations en β-carotène.

Tableau 7: Concentrations et Absorbances des solutions étalons du β-carotène pur à 95%

Solutions filles	Concentration (mg/100 mL)	Absorbance
S*	10	0.970
S_1	8	0.785
S_2	6	0.595
S_3	4	0.400
S_4	2	0.210

S* est la solution étalon mère

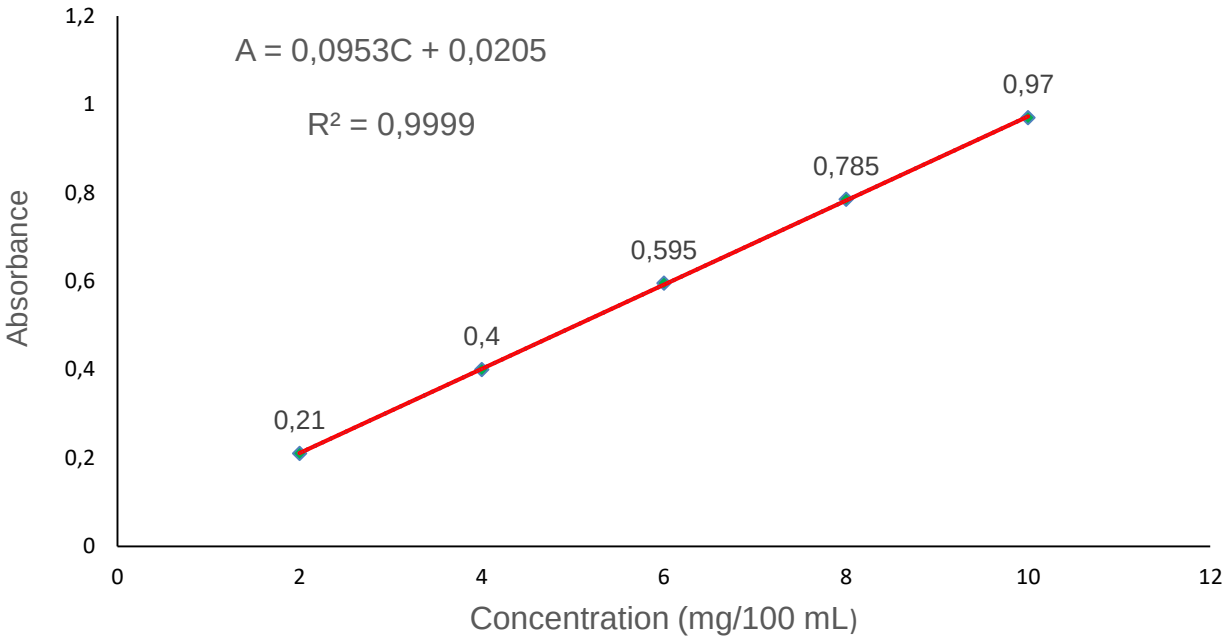


Figure 3: Droite d'étalonnage du β-carotène pur à 95%

La droite d'étalonnage obtenue confirme la linéarité entre concentration et absorbance, ce qui respecte la loi de Beer-Lambert avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.9999$ (le coefficient de détermination exprimant le degré de corrélation entre les données). Cela suggère que le modèle de droite d'étalonnage est fiable pour estimer la concentration de β-carotène par absorbance. Ainsi, nous pouvons l'utiliser pour déterminer les concentrations de β-carotène de nos échantillons à partir des absorbances mesurées.

IV.1.2. Teneur en β-carotène dans les tubercules de PDCO crus

Après broyage et homogénéisation de l'échantillon cru de PDCO, 5g sont dissouts dans 100 mL du mélange de solvants composée par l'hexane, l'acétone, l'éthanol et le toluène. Ensuite, nous avons procédé à l'extraction séquentielle et au calcul de la teneur en β-carotène comme décrit au point III.10.

L'application des équations (3), (4) et (5) aux absorbances mesurées sur le HPLC équipé d'un détecteur UV-Vis à 450 nm donne les concentrations à partir desquelles nous avons calculé la teneur du β-carotène (µg/g) dans l'échantillon cru de PDCO (tableau 8).

Tableau 8 : Absorbances, concentrations et teneur en β-carotène dans l'échantillon cru de PDCO

Extraction N°	Absorbance (A)	Conc. déduite (µg/mL)	V.E (mL)	Masse de β-C (µg)	Masse cumulée (µg)	Teneur en β-C (µg/g)
1	A1=0.433	C1=4.328	100	432.8	432.8	
2	A2=0.394	C2=3.920	100	392.0	824.8	
3	A3=0.357	C3=3.531	100	353.1	1177.9	
4	A4=0.322	C4=3.164	100	316.4	1494.3	298.86

A : absorbance lue ; Conc. : Concentration ; β-C : β-carotène ; V.E : volume extrait.

IV.1.3. Teneurs en β-carotène pour les différentes méthodes de cuisson

Après la cuisson des tubercules de PDCO, l'application des équations (3), (4) et (5) quand les absorbances sont lues sur le HPLC équipé d'un détecteur UV-Vis réglé à 450 nm donne les concentrations à partir desquelles nous avons calculé la teneur en β-carotène (µg/g) de chaque échantillon de PDCO après les différentes méthodes de cuisson (tableau 9).

Tableau 9: Absorbances, concentrations, teneur en β-carotène et valeur en vitamine A de PDCO après les différentes méthodes de cuisson

Extraction N°	**Absorbance**	**Conc. déduite (µg/mL)**	**V.E (mL)**	**Masse en β-C (µg)**	**Masse cumulée (µg)**	**Teneur en β-C (µg/g)**	**Valeur en vit A (µg** EAR/**100g)**	**Méthode de cuisson**
1	A1=0.423	C1=4.224	100	422.4	422.4			
2	A2=0.317	C2=3.111	100	311.1	733.5			
3	A3=0.278	C3=2.702	100	270.2	1003.7			
4	A4=0.245	C4=2.356	100	235.6	1239.3	247.86	2065.5	E
1	A1=0.414	C1=4.129	100	412.9	412.9			
2	A2=0.360	C2=3.562	100	356.2	769.1			
3	A3=0.315	C3=3.090	100	309.0	1078.1			
4	A4=0.271	C4=2.628	100	262.8	1340.9	268.18	2234.83	V
1	A1=0.312	C1=3.058	100	305.8	305.8			
2	A2=0.274	C2=2.660	100	266.0	571.8			
3	A3=0.236	C3=2.261	100	226.1	797.9			
4	A4=0.198	C4=1.862	100	186.2	984.1	196.82	1640.16	FT
1	A1=0.342	C1=3.373	100	337.3	337.3			
2	A2=0.301	C2=2.943	100	294.3	631.6			
3	A3=0.264	C3=2.555	100	255.5	887.1			
4	A4=0.229	C4=2.187	100	218.7	1105.8	221.16	1843	FPR
1	A1=0.387	C1=3.845	100	384.5	384.5			
2	A2=0.353	C2=3.488	100	348.8	733.3			
3	A3=0.318	C3=3.121	100	312.1	1045.4			
4	A4=0.285	C4=2.775	100	277.5	1322.9	264.58	2204.83	M-O
1	A1=0.376	C1=3.730	100	373.0	373.0			
2	A2=0.337	C2=3.321	100	332.1	705.1			
3	A3=0.298	C3=2.911	100	291.1	996.2			
4	A4=0.260	C4=2.513	100	251.3	1247.5	249.5	2079.16	R
1	A1=0.393	C1=3.908	100	390.8	390.8			
2	A2=0.354	C2=3.499	100	349.9	740.7			
3	A3=0.318	C3=3.121	100	312.1	1052.8			
4	A4=0.283	C4=2.754	100	275.4	1328.2	265.64	2213.6	C
1	A1=0.358	C1=3.541	100	354.1	354.1			
2	A2=0.305	C2=2.985	100	298.5	652.6			
3	A3=0.272	C3=2.639	100	263.9	916.5			
4	A4=0.241	C4=2.313	100	231.3	1147.8	229.56	1913	G

V.E : volume extrait ; β-C : β-carotène ; E : ébullition ; V : vapeur ; FT : friture avec huile de tournesol ; FPR : friture avec huile de palme raffinée ; M-O : micro-ondes ; R : rôtissage ; C : cuisson en cendre ; G : grillade ; EAR : équivalent de l'activité rétinol (12 µg de β-carotène = 1 µg de rétinol).

IV.1.4. Couverture des besoins en vitamine A selon l'âge, le sexe, l'état physiologique et par méthode de cuisson

Selon FAO/WHO (2004), pour les caroténoïdes alimentaires issus de légumes cuits ou fruits bien préparés, un ratio de conversion du bêta-carotène en rétinol de 12:1 est recommandé à condition qu'il y ait la présence de graisses dans le repas. Un facteur de conversion 21:1 peut être utilisé pour des régimes pauvres en graisses, riches en fibres ou à des carences en micronutriments (West Clive E., 2002).

Signalons que le facteur de conversion inclue l'effet combiné de l'absorption intestinale et de la conversion métabolique du bêta-carotène en rétinol.

Dans les conditions normales, le pourcentage de couverture des besoins en vitamine A biologiquement active (rétinol) selon les groupes d'âge, le sexe et l'état physiologique est calculé comme suit :

$$\text{Couverture (\%)} = \left(\frac{Teneur\ en\ \beta-carotène\ \left(\frac{\mu g}{g}\right) \times Quantité\ consommée\ (g)}{Facteur\ de\ conversion\ (12{:}1) \times ANR\ (\mu g)}\right) \times 100$$

Au regard des apports nutritionnels recommandés (ANR) en vitamine A (tableau 3), nos résultats sur la teneur en β-carotène (µg/g) (tableau 9) nous permettent de trouver le pourcentage de couverture des besoins en vitamine A (tableau 10).

Tableau 10 : Pourcentage de couverture des besoins en vitamine A /100 g de PDCO consommée

Méthode de cuisson	Teneur en β-carotène (µg/g)	**Pourcentage de couverture des besoins journaliers en vitamine A**										
		Nourrissons		Enfants			Adoles-cents	Adultes			FE 800	FA 850
		0-6 mois	7-12 mois	1-3 ans	4-6 ans	7-9 ans	10-18 ans	19-65 ans		65 ans et plus		
								Homme	Femme			
E	247.86	550	516	516	459	413	344	344	413	344	258	243
V	268.18	595	558	558	496	446	372	372	446	372	279	263
FT	196.82	437	410	410	364	328	273	273	328	273	205	193
FPR	221.16	491	461	461	409	368	307	307	368	307	230	217
M-O	264.58	588	551	551	490	441	367	367	441	367	276	259
R	249.5	554	520	520	462	416	346	346	416	346	260	244
G	229.56	510	478	478	425	382	318	318	382	318	239	225
C	265.64	590	553	553	492	443	369	369	443	369	277	260

FE : femme enceinte ; FA : femme allaitante ; β-C : β-carotène ; E : ébullition ; V : vapeur ; FT : friture avec huile de tournesol ; FPR : friture avec huile de palme raffinée ; M-O : micro-ondes ; R : rôtissage ; G : grillade ; C : cuisson en cendre.

Ces résultats montrent qu'une portion de 100 g de PDCO cuites par n'importe quelle méthode satisfait les besoins journaliers en vitamine A de tous les groupes d'âge, indépendamment du sexe et de l'état physiologique.

Les méthodes traditionnelles comme l'ébullition et la cuisson en cendres, économiquement accessibles et nécessitant peu d'équipements ou de ressources supplémentaires sont idéales pour les ménages burundais et jouent un rôle essentiel dans la couverture des besoins en vitamine A. Bien que les méthodes modernes comme la cuisson à la vapeur ou aux micro-ondes garantissent une meilleure rétention du β-carotène, leur accessibilité reste limitée. Les méthodes de friture présentent des pertes importantes en β-carotène, avec une couverture nettement inférieure à celle des autres méthodes. Elles sont donc moins adaptées pour maximiser l'apport en vitamine A, même si elles restent accessibles.

Ainsi, les PDCO, qu'elles soient préparées avec des méthodes traditionnelles ou modernes, représentent une excellente source de vitamine A pour ces catégories.

IV.1.5. Impact des différentes méthodes de cuisson sur la rétention du β-carotène dans les patates douces à chair orange

L'application de la formule **(7)** nous donne le pourcentage de rétention réelle du β-carotène après les différentes méthodes de cuisson. Le poids de l'échantillon après cuisson est exprimé comme la moyenne en deux exemplaires. La teneur en β-carotène et la rétention réelle du β-carotène dans l'échantillon après cuisson sont présentées dans le tableau 11.

Tableau 11: Pourcentage de rétention du β-carotène après les différentes méthodes de cuisson

Méthode de cuisson	Durée de cuisson (min)	Poids moyen après cuisson (g)	Teneur en β-C dans l'échantillon cru (µg/g)	Teneur en β-C dans l'échantillon après cuisson (µg/g)	RR (%) du β-carotène
E	20	453.2	298.86	247.86	75.1
V	15	441.7	298.86	268.18	79.2
FT	4	315.1	298.86	196.82	41.5
FPR	4	329.4	298.86	221.16	48.7
M-O	6	398.3	298.86	264.58	70.5
R	30	386.6	298.86	249.5	64.5
G	20	362.8	298.86	229.56	55.7
C	15	391.0	298.86	265.64	69.5

β-C : β-carotène ; RR : rétention réelle ; E : ébullition ; V : vapeur ; FT : friture avec huile de tournesol ; FPR : friture avec huile de palme raffinée ; M-O : micro-ondes ; R : rôtissage ; G : grillade ; C : cuisson en cendre.

IV.1.5. 1. Rétention du β-carotène

La rétention du β-carotène (RR) est calculée en comparant la teneur en β-carotène après cuisson à celle dans l'échantillon cru. La méthode la plus efficace pour conserver le β-carotène est celle qui affiche le pourcentage le plus élevé.

- **Ébullition** (durée : 20 minutes, RR **:** 75,1 %)

L'ébullition limite l'exposition directe à l'air et utilise une température modérée (~100 °C).

Toutefois, la solubilisation partielle du β-carotène dans l'eau de cuisson entraîne des pertes car des études ont montré que l'immersion prolongée dans l'eau augmente les pertes hydrosolubles (Jiménez-Monreal et al., 2009). C'est une technique efficace mais nécessite une récupération de l'eau de cuisson pour réduire les pertes.

- **Vapeur** (durée : 15 minutes, RR **:** 79,2 %)

Cette méthode préserve davantage les nutriments en limitant le contact direct avec l'eau et l'air. La durée modérée et l'absence de lessivage favorisent une meilleure conservation des nutriments (Bengtsson et *al*., 2008).

- **Friture** (durée : 4 minutes, RR **:** 41,5 et 48,7 % selon l'huile utilisée)

Les températures élevées (>160 °C) dégradent rapidement le β-carotène par oxydation et isomérisation, aggravées par la teneur en oxygène des huiles riches en acides gras polyinsaturés (Kolawole et *al*., 2020). C'est une méthode non recommandée pour préserver les caroténoïdes, sauf avec des huiles stables (ex. huile d'olive).

- **Micro-ondes** (durée : 6 minutes, RR : 70,5 %)

Le temps de cuisson réduit limite la dégradation thermique et l'oxydation. Toutefois, une exposition prolongée à la chaleur par effet micro-onde peut également causer des pertes (Lee et *al*., 2018). C'est une bonne option, surtout pour les usages rapides, mais nécessite un calibrage précis du temps et de la puissance.

- **Rôtissage** (durée : 30 minutes**,** RR **:** 64,5 %), et **Grillade** (durée : 20 minutes, RR **:** 55,7 %)

Bien que ces méthodes caramélisent la surface et rehaussent les saveurs, la chaleur non seulement directe mais sèche et prolongée favorise des pertes significatives de caroténoïdes (Mordi et *al*., 2020). C'est à éviter pour maximiser la conservation nutritionnelle.

- **Cuisson en cendre** (durée : 15 minutes, RR **:** 69,5 %)

La cuisson en cendre, bien que moins courante, semble offrir une rétention modérée du β-carotène. Elle présente l'avantage d'une cuisson indirecte, où l'aliment est enveloppé dans des cendres chaudes. Cela permet une chaleur modérée qui aide à préserver le β-carotène.

IV.1.5.2. Comparaison des méthodes de cuisson

- Les méthodes douces (vapeur, ébullition, micro-ondes) permettent de mieux conserver le β-carotène avec des rétentions supérieures à 70 %. Ces méthodes sont idéales pour préserver les nutriments tout en garantissant une cuisson correcte des patates douces.

- Les méthodes à chaleur plus intense comme la friture et le rôtissage entraînent des pertes de β-carotène importantes (moins ou autour de 50 % de rétention), ce qui diminue la valeur nutritionnelle de l'aliment.
- La cuisson en cendre se situe entre les méthodes douces et agressives, avec une RR de 69,5 %**,** ce qui montre qu'elle conserve une quantité raisonnable de β-carotène, mais avec des pertes notables par rapport à des méthodes comme la vapeur ou l'ébullition.

IV.1.5.3. Impact sur la valeur nutritionnelle

- Le β-carotène est un nutriment essentiel, un précurseur de la vitamine A, et sa rétention dans l'aliment après cuisson est cruciale pour maximiser les bénéfices nutritionnels. Les méthodes de cuisson douce (vapeur, micro-ondes) sont donc recommandées pour conserver les qualités nutritionnelles des patates douces.
- Une perte importante de β-carotène (comme observée dans la friture) pourrait réduire les avantages de la consommation de PDCO, particulièrement dans les contextes où la conservation des nutriments est une priorité.

IV.1.5.4. Conclusion partielle

Les résultats montrent que les méthodes de cuisson douce (vapeur, ébullition et micro-ondes) sont les plus efficaces pour conserver le β-carotène dans les PDCO. La cuisson en cendre est également une bonne option, bien qu'elle entraîne une perte plus importante de β-carotène par rapport à la vapeur et l'ébullition. Les méthodes plus agressives, comme la friture et le rôtissage, devraient être évitées si l'objectif est de maximiser la conservation des nutriments.

IV.1.6. Teneurs en β-carotène après les différentes méthodes de séchage

De la même manière que la cuisson, pour le séchage des tubercules de PDCO, l'application des équations (3), (4) et (5) quand l'absorbances est lue sur le HPLC équipé d'un détecteur UV-Vis à 450 nm reste valable pour le calcul de la teneur en β-carotène (µg/g) de chaque échantillon de PDCO après les différentes méthodes de séchage (tableau 12).

Tableau 12: Absorbances, concentrations, teneur en β-carotène et valeur en vitamine A de PDCO après les différentes méthodes de séchage

Extrait N°	**Absorbance**	**Conc. déduite (µg/mL)**	**V.E (mL)**	**Masse de β-C (µg)**	**Masse cumulée (µg)**	**Teneur en β-C (µg/g)**	**Valeur en vitamine A (µg** EAR **/100g)**	**Méthode de séchage**
1	A1=0.339	C1=3.342	100	334.2	334.2			
2	A2=0.302	C2=2.953	100	295.3	629.5			
3	A3=0.253	C3=2.439	100	243.9	873.4			
4	A4=0.218	C4=2.072	100	207.2	1080.6	216.12	1801	Soleil direct
1	A1=0.379	C1=3.761	100	376.1	376.1			
2	A2=0.365	C2=3.614	100	361.4	737.5			
3	A3=0.302	C3=2.439	100	243.9	981.4			Soleil
4	A4=0.268	C4=2.597	100	259.7	1241.1	248.22	2068.5	indirect
1	A1=0.361	C1=3.572	100	357.2	357.2			
2	A2=0.319	C2=3.132	100	313.2	670.4			
3	A3=0.277	C3=2.691	100	269.1	939.5			
4	A4=0.238	C4=2.282	100	228.2	1167.7	233.54	1946.16	Air libre
1	A1=0.388	C1=3.856	100	385.6	385.6			
2	A2=0.347	C2=3.426	100	342.6	728.2			
3	A3=0.308	C3=3.016	100	301.6	1029.8			
4	A4=0.272	C4=2.639	100	263.9	1293.7	258.74	2156.16	Etuve
1	A1=0.407	C1=4.055	100	405.5	405.5			
2	A2=0.365	C2=3.614	100	361.4	766.9			
3	A3=0.325	C3=3.195	100	319.5	1086.4			Micro-
4	A4=0.289	C4=2.817	100	2	1368.1	273.62	2280.16	ondes

V.E : volume extrait ; β-C : β-carotène ; EAR : équivalent d'activité rétinol

IV.1.7. Impact des différentes méthodes de séchage sur la rétention du β-carotène dans les patates douces à chair orange

De la même manière que la cuisson, le pourcentage de rétention réelle du β-carotène dans les tubercules de PDCO après les différentes méthodes de séchage est calculé sur base de la formule **(7)** et les résultats sont présentés dans le tableau 13.

Tableau 13: Pourcentage de rétention du β-carotène dans les PDCO après les différentes méthodes de séchage

Méthode et conditions de séchage	Poids de l'échantillon après séchage (g)	Teneur en β-C dans l'échantillon cru (µg/g)	Teneur en β-C dans l'échantillon après séchage (µg/g)	RR en %
Soleil direct (température ambiante, 3 jours)	327.9	298.86	216.12	47.4
Soleil indirect, température autour de 43°C, 10h)	381.3	298.86	248.22	63.3
Air libre (température ambiante, 5jours)	344.5	298.86	233.54	53.8
Etuve (60°C, 8 heures)	395.8	298.86	258.74	68.5
Micro-ondes (60°C, 200W, 3h)	400.2	298.86	273.62	73

β-C : β-carotène ; RR : rétention réelle.

IV.1.7.1. Teneur en β-carotène après séchage

La teneur en β-carotène est un indicateur clé pour évaluer la qualité nutritionnelle après séchage. La teneur en β-carotène après séchage a diminué dans tous les cas par rapport à l'échantillon cru (298,86 µg/g). Cette diminution est due à la dégradation partielle du β-carotène, un composé sensible à la chaleur et à la lumière, qui peut se dégrader pendant les processus de séchage.

IV.1.7.2. Rétention du β-carotène

Le pourcentage de rétention (RR) du β-carotène reflète la proportion de β-carotène préservée après le séchage.

- **Séchage au soleil direct (**température ambiante, 3 jours ; RR : 47,4 %) :

L'exposition prolongée à la lumière UV et à l'oxygène favorise la dégradation photochimique et oxydative du β-carotène. De plus, les températures variables (~30-40 °C) réduisent la stabilité des caroténoïdes. C'est une méthode de séchage peu recommandée pour conserver les nutriments.

- **Séchage à l'air libre (**température ambiante, 5 jours ; RR : 53,8 %) :

Bien que similaire au séchage solaire, cette méthode est parfois plus rapide selon les conditions environnementales, mais les pertes restent significatives en raison de l'oxydation. C'est une méthode marginalement meilleure que le séchage solaire, mais toujours limité

- **Séchage solaire indirect à 43°C** (température autour de 43°C, 10h) :

La rétention augmente à 63,3% (248,22 µg/g) grâce à une température modérée et à une durée plus courte (10 heures).

- **Séchage en étuve** (60°C, 8 heures ; RR : 68,5 %) :

Une rétention encore meilleure (68,5%, 258,74 µg/g) est obtenue en raison de la stabilité thermique et du contrôle de l'humidité. Le séchage en étuve, à une température contrôlée de 60°C, réduit l'exposition à la lumière et à l'oxygène, limitant ainsi la dégradation des nutriments. Cette méthode préserve également la structure cellulaire (Muhammad Tayyab Rashid, 2022). C'est une méthode industrielle efficace.

- **Séchage aux micro-ondes** (60°C, 200W, 3h ; RR : 73 %) :

Cette méthode utilise une chaleur rapide et directe, ce qui permet de réduire considérablement le temps de séchage. L'absence d'oxygène et de la lumière minimise la dégradation thermique et oxydative du β-carotène. De plus, la température relativement basse (60°C) empêche la dénaturation excessive du β-carotène. Toutefois, des temps de séchage trop longs ou des températures mal contrôlées peuvent réduire les bénéfices. C'est la méthode la plus efficace pour maximiser la rétention.

IV.1.7.3. Comparaison des méthodes de séchage

Méthodes lentes à température ambiante (séchage au soleil et à l'air libre) montrent des pertes de β-carotène importantes en raison de l'exposition prolongée à la lumière et à l'oxygène. La rétention est inférieure à 55 %, ce qui indique une dégradation importante.

Méthodes rapides et contrôlées (étuve et micro-ondes) préservent davantage de β-carotène, avec des rétentions respectives de 68,5 % et 73 %. Ces méthodes contrôlées réduisent l'exposition à des facteurs de dégradation (lumière, oxygène) et limitent la perte de nutriments.

IV.1.7.4. Conclusion partielle

Les résultats montrent que les **méthodes de séchage rapide et contrôlé** (étuve et micro-ondes) sont les plus efficaces pour préserver le β-carotène dans les PDCO, avec une conservation optimale obtenue par le séchage aux micro-ondes (73 % de rétention). Les **méthodes à température ambiante** sont moins favorables pour préserver le β-carotène en raison de la durée prolongée et de l'exposition à des conditions qui favorisent l'oxydation.

Pour maximiser la teneur en β-carotène après séchage, il est donc préférable de privilégier des méthodes à température contrôlée et de durée réduite.

IV.1.8. Capacité de réhydratation des farines de PDCO

L'application de la formule **(8**) nous donne les valeurs de la CR des farines de PDCO obtenues après les différentes méthodes de séchage et les résultats sont présentés dans le tableau 14.

Tableau 14: Capacité de réhydratation des farines de PDCO obtenues après les différentes méthodes de séchage

Méthode de Séchage	**Poids de l'échantillon sec (g)**	**Poids moyen de l'échantillon réhydraté**	**Capacité de Réhydratation (CR)**
Au soleil direct (température ambiante ,3 jours)	3	6.43	1.14
Au soleil indirect, température autour de 43°C, 10h)	3	8.79	1.93
Air libre (température ambiante, 5jours)	3	7.70	1.56
Etuve (60°C, 8 heures)	3	8.87	1.95
Micro-ondes (60°C, 200W, 3h)	3	9.01	2.00

Les farines séchées aux micro-ondes et en étuve ont montré une meilleure capacité de réhydratation, corrélée positivement avec des taux de rétention élevés de β-carotène. Les méthodes douces préservent l'intégrité des matrices cellulaires et améliorent la réhydratabilité.

Interprétation :

- **Séchage au soleil direct (CR = 1.14) :**

  Le séchage au soleil expose les échantillons à des températures fluctuantes et à une lumière directe, provoquant des pertes importantes d'humidité libre et de liaisons hydrophiles nécessaires à une réhydratation efficace. La dégradation des parois cellulaires sous l'effet de l'oxydation et de la photodégradation limite la capacité des échantillons à réabsorber de l'eau. Cette méthode est peu efficace pour préserver la structure cellulaire.

- **Séchage solaire indirect (CR = 1.93) :**

  Le contrôle partiel de la température (~43°C) améliore la rétention de l'intégrité des cellules et réduit l'exposition directe à la lumière UV. Cette condition favorise une meilleure capacité de réhydratation, bien que le processus reste affecté par une durée relativement longue, contribuant à certaines dégradations. C'est une méthode intermédiaire avec des résultats modérés.

- **Séchage à l'air libre (CR = 1.56) :**

  Bien que similaire au séchage au soleil, la durée prolongée (5 jours) à température ambiante aggrave les pertes d'eau intracellulaire et accentue la dégradation des polysaccharides. Cette durée excessive réduit la capacité de réhydratation. Ce séchage est moins performant que le séchage solaire contrôlé.

- **Séchage en étuve (CR = 1.95) :**

  Une température constante et modérée (60°C) permet une déshydratation rapide tout en préservant la structure cellulaire. Les liaisons hydrophiles sont en grande partie intactes, favorisant une réhydratation plus efficace. La protection contre la lumière et l'oxygène réduit les réactions oxydatives. C'est une méthode performante pour maximiser la qualité des échantillons.

- **Séchage aux micro-ondes (CR = 2.00) :**

  Cette méthode combine une déshydratation rapide à une température contrôlée (60°C) et une absence d'exposition prolongée à l'oxygène ou à la lumière. La chaleur micro-ondes cible les molécules d'eau, ce qui limite les dégâts structurels des matrices polysaccharidiques.

  La conservation optimale des propriétés physiques favorise une réhydratation maximale.

IV.1.9. Corrélation entre la rétention de β-carotène et la capacité de réhydratation

Dans le tableau 15, le coefficient de corrélation de Pearson entre la rétention de β-carotène après le séchage et la capacité de réhydratation des farines a été calculé à l'aide du logiciel Excel.

Rappelons que :

- Si le coefficient de corrélation est proche de **+1**, cela indique une forte corrélation positive (lorsque l'une des variables augmente, l'autre tend à augmenter aussi) ;
- Si le coefficient est proche de **-1**, cela indique une forte corrélation négative (lorsque l'une des variables augmente, l'autre diminue) ;
- Si le coefficient est proche de **0**, cela indique qu'il n'y a pas de corrélation linéaire significative entre les deux variables.

Tableau 15 : Relation entre le pourcentage de rétention du β-carotène dans les PDCO après séchage et la capacité de réhydratation des farines obtenues

Méthodes et conditions de séchage	**Rétention réelle (%)**	**Capacité de réhydratation**	**Coefficient de corrélation de Pearson (*r*)**
Soleil direct (température ambiante ,3 jours)	47.4	1.14	$r=0.86$
Soleil indirect (température autour de 43°C, 10 heures)	63.3	1.93	
Air libre (température ambiante, 5 jours)	44.7	1.56	
Etuve (60°C, 8 heures)	68.5	1.95	
Micro-ondes (60°C, 200W, 3 heures)	73	2.00	

La corrélation entre la rétention de β-carotène et la capacité de réhydratation pour les méthodes de séchage est forte et positive, avec un coefficient de corrélation de $r = 0.86$. Cela indique que les méthodes de séchage qui préservent davantage le β-carotène tendent également à offrir une meilleure capacité de réhydratation.

IV.2. Discussion des résultats

Les techniques de cuisson et de séchage ont des effets variables sur la rétention du β-carotène (provitamine A) dans les patates douces à chair orange (PDCO). Ces effets sont analysés ci-dessous en fonction des mécanismes de dégradation thermique, oxydative et photochimique, appuyés par des données expérimentales et des références bibliographiques.

IV.2.1. Effets de la cuisson sur la rétention du β-carotène

Les résultats montrent que la cuisson à la vapeur est la méthode la plus efficace pour préserver le β-carotène, avec une rétention de 79,2 %. Ces données concordent avec celles de Bengtsson et *al.*(2008) qui rapportent une rétention moyenne de 77% et 87.79±2.34% pendant 20 minutes de cuisson à la vapeur (Wu et al., 2008).

La vapeur limite l'exposition à l'eau et à l'oxygène, réduisant les pertes par lixiviation et oxydation. Par ailleurs, la chaleur douce (~100 °C) favorise la conservation des caroténoïdes en minimisant la thermolyse.

L'ébullition (75,1 % de rétention) conserve légèrement moins de β-carotène que la vapeur. Cette perte est attribuée à la lixiviation dans l'eau de cuisson.

Selon Delia B. Rodriguez-Amaya (1997), jusqu'à 20 % des caroténoïdes peuvent être transférés dans l'eau. Cependant, avec une rétention de 75,1 %, nos résultats restent proches des valeurs de 83 % rapportées par Van Jaarsveld et *al.* (2006).

Avec la cuisson aux micro-ondes, nous avons observé une rétention de 70,5 % confirmant son efficacité pour minimiser les pertes thermiques et par lixiviation grâce à une courte durée de cuisson. Lee et *al.* (2018) ont rapporté des taux similaires (~75 %), soulignant que cette méthode est particulièrement adaptée pour préserver les micronutriments tout en réduisant le temps de cuisson.

Dans nos résultats, la friture a entraîné des pertes significatives (>50 %), principalement en raison des températures élevées (160°C) et de l'oxydation dans des huiles polyinsaturées comme l'huile de tournesol. Ces pertes sont plus importantes dans notre étude que celles rapportées par Bengtsson et *al.* (2008) (76-80 % selon la variété et l'huile). Une explication pourrait être la composition des huiles utilisées. Kolawole et *al.* (2020) ont montré que l'huile d'olive, riche en antioxydants, limite mieux les pertes que l'huile de tournesol.

D'après les résultats, la grillade et le rôtissage provoquent une dégradation thermique du β-carotène, qui dépend de la température et de la durée. Les températures élevées favorisent la thermolyse, réduisant les concentrations de caroténoïdes. Lemmens et *al*. (2010), Stahl & Sies (2005) & Mordi et *al*. (2020) ont démontré que les pertes peuvent atteindre plus de 50 % lorsque les aliments sont exposés à des températures supérieures à 180 °C. La caramélisation et la dégradation thermique restent des limites majeures pour ces méthodes traditionnelles.

Enfin, nous pouvons retenir que la cuisson à la vapeur et aux micro-ondes sont les plus adaptées pour préserver le β-carotène (≥70 % de rétention). L'ébullition reste acceptable, mais les pertes par lixiviation réduisent son efficacité.

IV.2.2. Rétention du β-carotène après séchage

Les résultats montrent que le séchage solaire direct (47,4 % de rétention) est la méthode la moins performante, principalement en raison de l'exposition prolongée aux UV et à l'oxygène et à des températures variables. Lewicki (2009) explique que les pertes photochimiques et oxydatives sont amplifiées par la durée de séchage. Bien que peu coûteux, ce procédé est inefficace pour préserver les caroténoïdes.

Quant au séchage solaire indirect (64,3 % de rétention), avec une température modérée (~43 °C) et une durée réduite (10 h), les résultats montrent que cette méthode améliore la rétention par rapport au séchage solaire classique (47,4 %). Cette différence est attribuée à une exposition limitée aux UV et à l'oxygène.

Le séchage à l'air libre (53,3 % de rétention), proche du séchage solaire direct s'est révélé légèrement meilleur grâce à l'absence de lumière UV directe. Cependant, la durée prolongée (5 jours) entraîne une oxydation accrue, limitant les performances de cette méthode.

Nos résultats montrent que l'étuve, à une température contrôlée de 60 °C pendant 8 heures, conserve bien les caroténoïdes (68,5 % de rétention).

Rashid (2022) et Lewicki (2009) ont confirmé que le séchage sous des conditions modérées réduit les pertes thermiques et oxydatives, tout en maintenant les qualités nutritionnelles.

Notre étude confirme que le séchage aux micro-ondes est la méthode la plus efficace, avec une rétention de 73 %.

Cette performance est attribuée à une déshydratation rapide (~60 °C, 200 W, 3h), minimisant les pertes par oxydation et par photodégradation. Muhammad Tayyab Rashid (2022) & Wu et *al.* (2008) ont rapporté également des taux élevés de rétention (>70 %) pour des produits séchés rapidement sous vide ou aux micro-ondes.

IV.2.3. Relation entre rétention et capacité de réhydratation

Les résultats montrent une corrélation forte (r = 0,86) entre la rétention du β-carotène et la capacité de réhydratation des farines de PDCO obtenues. Les méthodes rapides et contrôlées (micro-ondes, étuve) préservent mieux la structure cellulaire, favorisant à la fois la rétention des caroténoïdes et une meilleure interaction avec l'eau. Les travaux de Muhammad Tayyab Rashid (2022) ont confirmé que les méthodes de séchage qui préservent les structures cellulaires, comme les micro-ondes et l'étuve, favorisent également une meilleure interaction avec l'eau, améliorant les propriétés texturales et fonctionnelles des farines.

Les techniques modernes devraient être privilégiées, notamment pour produire des aliments enrichis en β-carotène destinés à lutter contre les carences en vitamine A

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

La présente étude visait à évaluer l'effet des techniques de cuisson et de séchage sur la rétention du β-carotène dans les patates douces à chair orange (PDCO), variété NASPOT 12, et à analyser la relation entre cette rétention et la capacité de réhydratation des farines obtenues. Les hypothèses formulées, suggérant que les méthodes douces et contrôlées préserveraient mieux le β-carotène et amélioreraient la qualité fonctionnelle des produits, ont été confirmées par les résultats expérimentaux.

Les analyses ont révélé que la teneur initiale en β-carotène des PDCO crues est de 298,86 µg/g. La cuisson à la vapeur a offert la meilleure rétention (79,2 %), suivie de l'ébullition (75,1 %), de la cuisson aux micro-ondes (70,5 %) et de la cuisson en cendres chaudes (69,5 %). Les méthodes comme le rôtissage (64,5 %), la grillade (55,7 %) et la friture (41,5 %) ont entraîné des pertes importantes en raison de l'exposition prolongée à des températures élevées et à l'oxygène.

En termes de couverture des besoins en vitamine A, une portion de 100 g de PDCO cuites par n'importe quelle méthode couvre largement les besoins en vitamine A, dépassant souvent 100 % pour tous les groupes d'âge. Les techniques traditionnelles comme l'ébullition ou la friture garantissent déjà une couverture suffisante.

Pour le séchage, les méthodes modernes ont montré des performances supérieures. Le séchage aux micro-ondes (60 °C, 200 W, 3h) a conservé 73 % du β-carotène, tandis que l'étuve (60 °C, 8 heures) a permis une rétention de 68,5 %. Les méthodes plus lentes, comme le séchage solaire indirect (63,3 %), à l'air libre (53,8 %) et au soleil direct (47,4 %), ont présenté des pertes accrues en raison de l'exposition prolongée à la lumière et à l'oxygène.

Une corrélation positive significative (r = 0,86) a été établie entre la rétention du β-carotène et la capacité de réhydratation des farines. Les farines issues du séchage aux micro-ondes et en étuve ont montré les meilleures capacités de réhydratation, avec des valeurs respectives de 2,00 et 1,95, contre 1,93 pour le séchage solaire indirect, 1,56 pour le séchage à l'air libre et seulement 1,14 pour le séchage au soleil direct.

Ainsi, les PDCO, qu'elles soient préparées avec des méthodes traditionnelles ou modernes, représentent une excellente source de vitamine A pour ces catégories.

L'utilisation de techniques simples, comme l'ébullition, la cuisson en cendre ou la grillade restent suffisantes et accessibles pour garantir un apport adéquat, en particulier pour les populations vulnérables.

En conclusion, ces techniques permettent de surmonter les barrières technologiques et économiques liées aux méthodes modernes, tout en tirant parti des ressources locales.

PERSPECTIVES D'AVENIR

À la lumière de nos résultats, plusieurs perspectives s'ouvrent pour de futures recherches et applications pratiques :

- Des études supplémentaires pourraient être menées pour optimiser les paramètres des méthodes de séchage aux micro-ondes et en étuve, notamment en ajustant les températures et les durées de séchage pour maximiser la rétention de β-carotène tout en minimisant la consommation d'énergie ;
- Il serait également pertinent de réaliser des études sur l'impact sensoriel (goût, texture, couleur) des différentes méthodes de séchage et de cuisson. En effet, bien que certaines méthodes conservent mieux le β-carotène, elles peuvent affecter la qualité organoleptique des produits finis ;
- Tester des méthodes complémentaires, comme le séchage sous vide ou la lyophilisation, qui sont connues pour offrir une meilleure rétention des micronutriments ;
- Développer des campagnes de sensibilisation pour promouvoir les bienfaits des PDCO et des techniques de transformation adaptées ;
- Étendre l'utilisation des PDCO dans les produits transformés pour limiter les pertes au champ ou après récolte, en particulier dans les régions rurales ;
- Étendre la recherche à d'autres composés bioactifs (vitamine C, polyphénols) présents dans les PDCO, afin de maximiser les bénéfices nutritionnels globaux des méthodes de transformation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Abong', G. O., Ndanyi, V. C. M., Kaaya, A., Shibairo, S., Okoth, M. W., Lamuka, P. O., Odongo, N. O., Wanjekeche, E., Mulindwa, J., & Sopade, P. (2016). A review of production, post-harvest handling and marketing of sweetpotatoes in Kenya and Uganda. *Current Research in Nutrition and Food Science*, *4*(3), 162–181.

2. Ailla, M. A. R. K. L. F., Hakkar, S. A. K. T., & Im, J. U. N. G. Y. K. (2009). *In Vitro Bioaccessibility of β -Carotene in Orange Fleshed Sweet Potato (Ipomoea batatas , Lam .)*. 10922–10927.

3. Al-Saleh, I. A., Billedo, G., & El-Doush, I. I. (2006). Levels of selenium, Dl-α-tocopherol, Dl-γ-tocopherol, all-trans-retinol, thymoquinone and thymol in different brands of Nigella sativa seeds. *Journal of Food Composition and Analysis*, *19*(2–3), 167–175.

4. Ali, A., Yeoh, W. K., Forney, C., & Siddiqui, M. W. (2018). Advances in postharvest technologies to extend the storage life of minimally processed fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *58*(15), 2632–2649.

5. Bengtsson et al. (2008). ARTICLE IN PRESS Effects of various traditional processing methods on the all- trans β-carotene content of orange-fleshed sweet potato. *Journal of Food Composition and Analysis*, *21*, 134–143.

6. Black, R. E., Allen, L. H., Bhutta, Z. A., Caulfield, L. E., de Onis, M., Ezzati, M., Mathers, C., & Rivera, J. (2008). Maternal and child undernutrition: global and regional exposures and health consequences. *The Lancet*, *371*(9608), 243–260.

7. Blaner, W. S. (2020). Vitamin A and provitamin A carotenoids. *Present Knowledge in Nutrition*, *1*, 73–91.

8. Bogacz-Radomska, L., & Harasym, J. (2018). β-Carotene-properties and production methods. *Food Quality and Safety*, *2*(2), 69–74.

9. Bovell-Benjamin, A. C. (2007). Sweet Potato: A Review of its Past, Present, and Future Role in Human Nutrition. *Advances in Food and Nutrition Research*, *52*(06), 1–59.

10. Campos, H., & Caligari, P. D. S. (2017). Genetic improvement of tropical crops. In *Genetic Improvement of Tropical Crops*.

11. Chen, B. H., Peng, H. Y., & Chen, H. E. (1995). Changes of Carotenoids, Color, and Vitamin A Contents during Processing of Carrot Juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *43*(7), 1912–1918.

12. DEJIAN HUANG, B. O. and R. L. P. (2005). The Chemistry behind Antioxidant Capacity Assays. *Agricultural and Food Chemistry*, *53*, 16.

13. Delia B. Rodriguez-Amaya and Mieko Kimura. (2004). *HarvestPlus Handbook for Carotenoid Analysis*.

14. Delia B. Rodriguez-Amaya, P. . (2001). *A GUIDE TO ANALYSIS IN FOODS*

15. Delia B. Rodriguez-Amaya, P. D. (1997). Carotenoids and Food Preparation : The Retention of Provitamin A Carotenoids in Prepared , Processed , and Stored Foods. *Contract, January*, 93.

16. Fabiana F. De Moura, A. M. & E. B. (2013). Retention of Provitamin A Carotenoids in Staple Crops Targeted for Biofortification in Africa: Cassava, Maize and Sweet Potato. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *55*(9), 1246–1269.

17. FAO, & WHO. (2004). Vitamin and mineral requirements in human nutrition Second edition. *World Health Organization*, 35.

18. Gibrilla DUMBUYA, Habtamu Assega ALEMAYEHU, Md Mehedi HASAN, Maya MATSUNAMI, & Hiroyuki SHIMONO. (2021). Effect of soil temperature on growth and yield of sweet potato (<I>Ipomoea batatas</I> L.) under cool climate. *Journal of Agricultural Meteorology*, *77*(2), 118–127.

19. Gombart, A. F., Pierre, A., & Maggini, S. (2020). A review of micronutrients and the immune system–working in harmony to reduce the risk of infection. *Nutrients*, *12*(1).

20. Grantham-McGregor, S., Cheung, Y. B., Cueto, S., Glewwe, P., Richter, L., & Strupp, B. (2007). Developmental potential in the first 5 years for children in developing countries. *Lancet*, *369*(9555), 60–70.

21. Hagenimana, V., Carey, E. E., Gichuki, S. T., Oyunga, M. A., & Imungi, J. K. (1998). Carotenoid contents in fresh, dried and processed sweetpotato products. *Ecology of Food Nutrition*, *37*(5), 455–473.

22. Hagenimana, V., Low, J., Anyango, M., Kurz, K., Gichuki, S. T., & Kabira, J. (2001). Enhancing vitamin A intake in young children in Western Kenya: Orange-fleshed sweet potatoes and women farmers can serve as key entry points. *Food and Nutrition Bulletin*, *22*(4), 376–387.

23. Haile, F., Admassu, S., & Fisseha, A. (2015). Effects of pre-treatments and drying methods on chemical composition, microbial and sensory qualities of orange-fleshed sweet potato flour and porridge. *American Journal of Food Science and Technology*, *3*(3), 82–88.

24. Haskell, M. J., Jamil, K. M., Hassan, F., Peerson, J. M., Hossain, M. I., Fuchs, G. J., & Brown, K. H. (2004). Daily consumption of Indian spinach (Basella alba) or sweet potatoes has a positive effect on total-body vitamin A stores in Bangladeshi men. *American Journal of Clinical Nutrition*, *80*(3), 705–714.

25. Heider, B., Struelens, Q., Faye, É., Flores, C., Palacios, J. E., Eyzaguirre, R., de Haan, S., & Dangles, O. (2021). Intraspecific diversity as a reservoir for heat-stress tolerance in sweet potato. *Nature Climate Change*, *11*(1), 64–69.

26. Henry, L. K., Catignani, G. L., & Schwartz, S. J. (1998). Oxidative degradation kinetics of lycopene, lutein, and 9-cis and all-trans β-carotene. *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, *75*(7), 823–829.

27. Hiranvarachat, B., Suvarnakuta, P., & Devahastin, S. (2008). Isomerisation kinetics and antioxidant activities of β-carotene in carrots undergoing different drying techniques and conditions. *Food Chemistry*, *107*(4), 1538–1546.

28. Hodges, R. J., Buzby, J. C., & Bennett, B. (2011). Postharvest losses and waste in developed and less developed countries: Opportunities to improve resource use. *Journal of Agricultural Science*, *149*(S1), 37–45.

29. Hotz, C., & Gibson, R. S. (2007). Traditional food-processing and preparation practices to enhance the bioavailability of micronutrients in plant-based diets. *Journal of Nutrition*, *137*(4), 1097–1100.

30. IOM. (2001). Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. In *Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc*. NATIONAL ACADEMIES PRESS.

31. ISABU. (2018). *Bulletin Agronomique de la recherche*.

32. ISABU. (2023). *Fiche technique harmonisée de la culture de la patate douce*.

33. ISTEEBU. (2017). *Enquête Démographique et de Santé 2016-2017*. 24.

34. J., E.-E., P.C., O.-E., G.O., W., & M.B., V. (2021). Physicochemical, Functional and Pasting properties of Orange-Flesh Sweet Potato Starch, Soya bean and Groundnut Flour Complementary Food. *American Journal of Food Science and Technology*, *9*(3), 96–104.

35. Jiménez-Monreal, A. M., García-Diz, L., Martínez-Tomé, M., Mariscal, M., & Murcia, M. A. (2009). Influence of cooking methods on antioxidant activity of vegetables. *Journal of Food Science*, *74*(3), 97–103.

36. Kennedy, G. L., Pedro, M. R., Seghieri, C., Nantel, G., & Brouwer, I. (2007). Dietary diversity score is a useful indicator of micronutrient intake in non-breast-feeding Filipino children. *Journal of Nutrition*, *137*(2), 472–477.

37. Kidmose, U., Christensen, L. P., Agili, S. M., & Thilsted, S. H. (2007). *Effect of home preparation practices on the content of provitamin A carotenoids in coloured sweet potato varieties (Ipomoea batatas Lam .) from Kenya*. *8*, 399–406.

38. Kimura, M., Kobori, C. N., Rodriguez-Amaya, D. B., & Nestel, P. (2007). Screening and HPLC methods for carotenoids in sweetpotato, cassava and maize for plant breeding trials. *Food Chemistry*, *100*(4), 1734–1746.

39. Kolawole, F. L., Balogun, M. A., Oyeyinka, S. A., Adejumo, R. O., & Sanni-Olayiwola, H. O. (2020). Effect of processing methods on the chemical composition and bio-accessibility of beta-carotene in orange-fleshed sweet potato. *Journal of Food Processing and Preservation*, *44*(7), 1–9.

40. Korese, J. K., Chikpah, S. K., Hensel, O., Pawelzik, E., & Sturm, B. (2021). Effect of orange-fleshed sweet potato flour particle size and degree of wheat flour substitution on physical, nutritional, textural and sensory properties of cookies. *European Food Research and Technology*, *247*(4), 889–905.

41. Kourouma, V., Mu, T. H., Zhang, M., & Sun, H. N. (2019). Effects of cooking process on carotenoids and antioxidant activity of orange-fleshed sweet potato. *Lwt*, *104*(January), 134–141.

42. Krinsky, N. I., & Johnson, E. J. (2005). Carotenoid actions and their relation to health and disease. *Molecular Aspects of Medicine*, *26*(6), 459–516.

43. Krochmal-Marczak, B., Sawicka, B., Krzysztofik, B., Danilčenko, H., & Jariene, E. (2020). The effects of temperature on the quality and storage stalibity of sweet potato (Ipomoea batatas L. [Lam]) grown in Central Europe. *Agronomy*, *10*(11).

44. Ku, A. T., Huang, Y. S., Wang, Y. S., Ma, D., & Yeh, K. W. (2008). IbMADS1 (Ipomoea batatas MADS-box 1 gene) is involved in tuberous root initiation in sweet potato (Ipomoea batatas). *Annals of Botany*, *102*(1), 57–67.

45. Laurie, S. M., Faber, M., & Claasen, N. (2018). Incorporating orange-fleshed sweet potato into the food system as a strategy for improved nutrition: The context of South Africa. *Food Research International*, *104*(April 2017), 77–85.

46. Lawlor, D. W. (2002). Limitation to photosynthesis in water-stressed leaves: Stomata vs. Metabolism and the role of ATP. *Annals of Botany*, *89*(SPEC. ISS.), 871–885.

47. Lee, S., Choi, Y., Jeong, H. S., Lee, J., & Sung, J. (2018). Effect of different cooking methods on the content of vitamins and true retention in selected vegetables. *Food Science and Biotechnology*, *27*(2), 333–342.

48. Lemma, M. H. (2015). Techniques culturales de la patate douce: Manuel de formation des agents de développement et des producteurs. *M.*, *55*, 8–55.

49. Lemmens, L., De Vleeschouwer, K., Moelants, K. R. N., Colle, I. J. P., Van Loey, A. M., & Hendrickx, M. E. (2010). β-Carotene isomerization kinetics during thermal treatments of carrot puree. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *58*(11), 6816–6824.

50. Lewicki, P. P. (1998). Some Remarks on Rehydration of Dried Foods. *Food Engineering 36 (1998)*, *8774*(98), 7.

51. Lewicki, P. P. (2009). Effect of pre-drying treatment, drying.pdf. *International Journal of Food Properties : A Review*, *December 2012*, 1–22.

52. LINUS PAULING INSITUTE. (2016). Micronutrients for Health. *Linus Pauling Institute*, 1–4.

53. Liu, Y., Wu, J., Miao, S., Chong, C., & Sun, Y. (2014). Effect of a Modified Atmosphere on Drying and Quality Characteristics of Carrots. *Food and Bioprocess Technology*, *7*(9), 2549–2559.

54. Low, J. W., Arimond, M., Osman, N., Cunguara, B., Zano, F., & Tschirley, D. (2007). A food-based approach introducing orange-fleshed sweet potatoes increased vitamin A intake and serum retinol concentrations in young children in rural Mozambique. *Journal of Nutrition*, *137*(5), 1320–1327.

55. Low, J. W., Mwanga, R. O. M., Andrade, M., Carey, E., & Ball, A. M. (2017). Tackling vitamin A deficiency with biofortified sweetpotato in sub-Saharan Africa. *Global Food Security*, *14*(January), 23–30.

56. Low, J. W., & van Jaarsveld, P. J. (2008). The potential contribution of bread buns fortified with β-carotene-rich sweet potato in Central Mozambique. *Food and Nutrition Bulletin*, *29*(2), 98–107.

57. Magee, P. J., & McCann, M. T. (2019). Micronutrient deficiencies: Current issues. *Proceedings of the Nutrition Society*, *78*(2), 147–149.

58. Mordi, R. C., Ademosun, O. T., Ajanaku, C. O., Olanrewaju, I. O., & Walton, J. C. (2020). Free radical mediated oxidative degradation of carotenes and xanthophylls. *Molecules*, *25*(5), 1–13.

59. Muhammad Tayyab Rashid, K. L. et al. (2022). Energy efficient drying technologies for sweet potatoes: Operating and drying mechanism, quality-related attributes. *Frontiers in Nutrition*, 01–24.

60. Musyoka, J. N., Abong, G. O., Mbogo, D. M., Fuchs, R., Low, J., Heck, S., & Muzhingi, T. (2018). Effects of Acidification and Preservatives on Microbial Growth during Storage of Orange Fleshed Sweet Potato Puree. *International Journal of Food Science*, *2018*, 11.

61. radicals, natural antioxidants, and their reaction mechanisms. *RSC Advances*, *5*(35), 27986–28006.

62. Ofori, K. F., Antoniello, S., English, M. M., & Aryee, A. N. A. (2022). Improving nutrition through biofortification–A systematic review. *Frontiers in Nutrition*, *9*(December), 1–20.

63. Oke, M. O., & Workneh, T. S. (2014). Convective Hot Air Drying of Different Varieties of Blanched Sweet Potato Slices. *International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering*, *8*(12), 1296–1302.

64. Oliveira, L. D. M., Teixeira, F. M. E., & Sato, M. N. (2018). Impact of Retinoic Acid on Immune Cells and Inflammatory Diseases. *Mediators of Inflammation*, *2018*.

65. Omodamiro, R. M., Ukpabi, U. J., Duodu, K. G., Emmambux, N., Hanny, A., & Ani, J. C. (2022). Drying methods and slice thickness of orange- fleshed sweet potato flour and beta carotene content retension. *Food Science and Technology*, *13*(3), 1–5.

66. OMS. (2011). *Directive : Supplémentation en vitamine A chez les nourrissons et les enfants de 6 à 59 mois*.

67. Orjiakor, S. N., Okpala, L. C., Obiora, C. U., Okocha, S. O., & Odoh, E. N. (2022). Optimization of Process Conditions (Blanching Time and Temperature) on the Beta Carotene Content of Diced Orange Flesh Sweet Potato. *Asian Food Science Journal*, *21*(11), 29–37.

68. Owade, J. O., Abong, G. O., & Okoth, M. W. (2018). Production, utilization and nutritional benefits of orangfleshed sweetpotato (OFSP) puree bread: A review. *Current Research in Nutrition and Food Science*, *6*(3), 644–655.

69. Radek, M., & Savage, G. P. (2008). Oxalates in some Indian green leafy vegetables. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, *59*(3), 246–260.

70. Rendueles, E., Omer, M. K., Alvseike, O., Alonso-Calleja, C., Capita, R., & Prieto, M. (2011). Microbiological food safety assessment of high hydrostatic pressure processing: A review. *Lwt*, *44*(5), 1251–1260.

71. Reyes, L. F., & Cisneros-Zevallos, L. (2007). Degradation kinetics and colour of anthocyanins in aqueous extracts of purple- and red-flesh potatoes (Solanum tuberosum L.). *Food Chemistry*, *100*(3), 885–894.

72. Rice, A. L., Sacco, L., Hyder, A., & Black, R. E. (2000). Malnutrition as an underlying cause of childhood deaths associated with infectious diseases in developing countries. *Bulletin of the World Health Organization*, *78*(10), 1207–1221.

73. Sandmann, G. (2019). Antioxidant protection from UV-and light-stress related to carotenoid structures. *Antioxidants*, *8*(7), 1–13.

74. Semba, R. D. (1999). Vitamin A and immunity to viral, bacterial and protozoan infections. *Proceedings of the Nutrition Society*, *58*(3), 719–727.

75. Seongeung Lee, Youngmin Choi, Heon Sang Jeong, Junsoo Lee, J. S. (2018). Effect of different cooking methods on the content of vitamins and true retention in selected vegetables. *Food Science and Biotechnology*, *27*(2), 333–342.

76. Service, E. (2024). *Environmental factors affecting plant growth*. 1–16.

77. Shankar, A. H., & Prasad, A. S. (2018). *Zinc and immune function: the biological basis of altered resistance to infection*. *68*.

78. Sommer, A., & West, K. P. (1998). Vitamin A Deficiency : Health , Survival and Vision By Alfred Sommer and Keith P . West. *American Journal of Epidemiology*, *147*(12), 1175–1176.

79. Stahl, W., & Sies, H. (2005). Bioactivity and protective effects of natural carotenoids. *Biochimica et Biophysica Acta - Molecular Basis of Disease*, *1740*(2), 101–107.

80. Tanumihardjo, S. A. (2002). Factors influencing the conversion of carotenoids to retinol: Bioavailability to bioconversion to bioefficacy. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, *72*(1), 40–45.

81. Tuj Johra, F., Kumar Bepari, A., Tabassum Bristy, A., & Mahmud Reza, H. (2020). A mechanistic review of β-carotene, lutein, and zeaxanthin in eye health and disease. *Antioxidants*, *9*(11), 1–21.

82. Van Hal, M. (2000). Quality of sweetpotato flour during processing and storage. *Food Reviews International*, *16*(1), 1–37.

83. van Jaarsveld, P. J., Marais, D. W., Harmse, E., Nestel, P., & Rodriguez-Amaya, D. B. (2006). Retention of β-carotene in boiled, mashed orange-fleshed sweet potato. *Journal of Food Composition and Analysis*, *19*(4), 321–329.

84. VanBuren, C. A., & Everts, H. B. (2022). Vitamin A in Skin and Hair: An Update. *Nutrients*, *14*(14).

85. Vidailhet, M., Rieu, D., Feillet, F., Bocquet, A., Chouraqui, J.-P., Darmaun, D., Dupont, C., Frelut, M.-L., Girardet, J.-P., Hankard, R., Rozé, J.-C., Siméoni, U., Turck, D., & Briend, A. (2017). *La vitamine A chez l'enfant-Une mise au point du Comité de nutrition de la Société française de pédiatrie*. 1–29.

86. Vimala, B., Nambisan, B., & Hariprakash, B. (2011). Retention of carotenoids in orange-fleshed sweet potato during processing. *Journal of Food Science and Technology*, *48*(4), 520–524.

87. Wang, Z., Fang, B., Chen, X., Liao, M., Chen, J., Zhang, X., Huang, L., Luo, Z., Yao, Z., & Li, Y. (2015). Temporal patterns of gene expression associated with tuberous root formation and development in sweetpotato (Ipomoea batatas). *BMC Plant Biology*, *15*(1), 1–13.

88. Welch, A. (2021). Micronutrient malnutrition across the life course, sarcopenia and frailty. *Proceedings of the Nutrition Society*, *80*(3), 279–282.

89. Welch, R. M., & Graham, R. D. (2004). Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. *Journal of Experimental Botany*, *55*(396), 353–364.

90. West Clive E., E. A. r and L. M. Van. (2002). Proceedings of the XX International Vitamin A Consultative Group Meeting Consequences of Revised Estimates of Carotenoid Bioefficacy for Dietary Control of Vitamin A Deficiency in Developing Countries 1. *Journal of Nutrition*, *132*(9), 2920S-2926S.

91. WHO. (2009). Global prevalence of vitamin A deficiency in populations at risk 1995-2005 : WHO global database on vitamin A deficiency. *WHO Iris*, 55.

92. Wu, X., Sun, C., Yang, L., Zeng, G., Liu, Z., & Li, Y. (2008). β-carotene content in sweet potato varieties from China and the effect of preparation on β-carotene retention in the Yanshu No. 5. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *9*(4), 581–586.

93. Yao, Y., Zhang, R., Jia, R., Deng, Y., & Wang, Z. (2023). Impact of different cooking methods on the chemical profile of orange-fleshed sweet potato (Ipomoea batatas L.). *Lwt*, *173*(September 2022), 114288.

94. Yemesrach, T., Kelbessa, U., Abebe, B., & Geremew, T. (2021). Effect of Treatment on the Beta Carotene Retention of Orange Fleshed Sweet Potato Varieties Grown in Hawassa , Ethiopia. *Journal of Nutrition & Food Sciences*, *11*(4 No:799), 1–4.

95. Zang, L. Y., Sommerburg, O., & Van Kuijk, F. J. G. M. (1997). Absorbance changes of carotenoids in different solvents. *Free Radical Biology and Medicine*, *23*(7), 1086–1089.

96. Zhang, X., Xue, L., Wu, Z., Zhang, W., Zhang, H., Zhao, C., & Liu, D. (2023). Insight into the Effects of Drying Methods on Lanzhou Lily Rehydration. *Foods*, *12*(9).