

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ AKLI MOHAND OULHADJ – BOUIRA  
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET DES SCIENCES DE LA  
TERRE  
DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE



Réf : ...../UAMOB/F.SNV.ST/DEP.BIO/22

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**  
**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER**

**Domaine** : SNV      **Filière** : Sciences Biologiques  
**Spécialité** : Biochimie Appliquée

**Présenté par :**

*MENASRIA Salma & ABBAS Souhila*

*Thème*

**Optimisation d'une soupe déshydratée instantanée à base du  
Brocoli à l'aide d'un plan de mélange (D-optimal)**

**Soutenu le** : 06/07/2022

**Devant le jury composé de :**

<i>Nom et Prénom</i>	<i>Grade</i>		
<i>Remini Hocine</i>	<i>MCB</i>	<i>Univ. de Bouira</i>	<i>Président</i>
<i>Dahmoune Farid</i>	<i>Professeur</i>	<i>Univ. de Bouira</i>	<i>Promoteur</i>
<i>Moussa Hamza</i>	<i>Doctorant</i>	<i>Univ. de Bouira</i>	<i>Co-promoteur</i>
<i>Tighilet karim</i>	<i>MCB</i>	<i>Univ. de Bouira</i>	<i>Examineur</i>

**Année Universitaire : 2021/2022**

## *Remerciements*

*Tout d'abord, Nous rendons grâce à **Dieu**, le tout puissant et le très miséricordieux de nous avoir donné la patience, la force et le courage de mener à terme ce travail.*

*Nos plus sincères remerciements s'adressent à notre promoteur **professeur DAHMOUNE***

***Farid**, pour son encadrement de qualité, pour l'assistance qu'il nous a témoigné,*

*pour ces orientations, pour sa compréhension,*

*Nous souhaitons remercier notre Co-promoteur bientôt **M. MOUSSA HAMZA** pour les efforts qu'il avait consentis avec beaucoup de sympathie et de patience, pour sa gentillesse*

*et ces précieux conseils tout le long de notre mémoire,*

*Nos hommages les plus respectueux s'adressent à **M. REMINI Hocine** qui nous a fait*

*l'immense*

*honneur d'accepter la présidence de notre jury. Nous adressons également tous nos*

*remerciements à notre enseignant **M. TIGHILET Karim** d'avoir accepté d'être*

*examineur de notre mémoire.*

*Nos hommages également à tous nos Enseignants du Département de Biologie*

*pour avoir fortement contribué à enrichir nos connaissances.*

*Nous adressons également nos remerciements à toute la promotion Biochimie Appliquée*

*2022.*

*Nous voudrions adresser nos sincères reconnaissances et nos gratitudes les plus profondes à*

*tous ceux qui ont aidé à l'accomplissement de ce travail.*

# Dédicaces



**Q**uoi que de plus que de pouvoir partager les bons moments de sa vie avec les êtres qu'on aime. Arrivé au terme de mes études, C'est avec un très grand honneur que je dédie ce

modeste travail :

**À** mon très cher **papa**, en témoignage d'un profond amour et d'une grande reconnaissance pour tous les sacrifices qu'il a consentis pour mon bonheur. Papa, vous êtes l'être le plus cher à mon cœur. Aujourd'hui plus que jamais, j'apprécie la valeur de tes efforts, la justesse de ton éducation et le caractère précieux de tes conseils. Papa tu resteras pour moi un exemple (mon héros); mieux je dirai que toute fille souhaitera de t'avoir comme père. Recevez ici Papa tout mon respect. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'estime, le dévouement et l'amour que je porte pour vous, merci, merci et merci papa. Que Dieu te garde

**À** la meilleure femme au monde, la lumière de mes yeux, ma couronne, **maman**, pour son sacrifice et soutien qui m'ont donné confiance, courage et sécurité. Tout le vocabulaire Français ne me suffira jamais pour te décrire avec justesse ni pour te présenter mes remerciements, Je ne vous remercierai jamais assez. Pour toi je prie dieu de te garder en bonne santé.

**À** ma chère tante et 2eme maman **Djamila**, ainsi que, mon oncle **boukhalfa** ;

**À** mes très chers frères **Yacine et Momoh**;

**À** mes soeurs **Imane, Nawal et Rima**;

**À** mes chers amies **kahina et Ismahan et Souad** à toute la promo **biochimie 2022** ;

**À** tous mes profs, dès ma 1ere année primaire jusqu'aujourd'hui et au-delà inshallah ;

**À** mon cher binôme **Souhila**, ainsi que sa famille ;

**À** toi, celui qui est en train de lire mes dédicaces.

*Je suis si petit, si petit, Que bien trop souvent, on m'oublie.*

*Si fragile et si plein de vie, Mon nom est simplement merci.*

*Pleine de tendresse, je vous le dis, Du fond du cœur: un franc Merci !*

*Salma*

## *Dédicaces*



*Louange à dieu tout puissant, qui m'a permis de voir ce jour tant attendu*

*A mon très cher père Ahmed Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que tu es. Grâce à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension... Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi.*

*Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployés pour mon éducation et ma formation. Je t'aime papa et j'implore le tout-puissant pour qu'il t'accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse.*

*A ma très chère mère Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous, vos sacrifices innombrables et votre dévouement firent pour moi un encouragement. Vous avez guetté mes pas, et m'avez couvé de tendresse, ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Vous m'avez aidé et soutenu pendant de nombreuses années avec à chaque fois une attention renouvelée. Puisse Dieu, tout puissant vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.*

*A mes chers frères : Walid et Mohamed, je vous aime beaucoup.*

*A Mes Amis Nulle dédicace ne pourrait exprimer ma profonde affection et mon immense gratitude pour Tous les encouragements et soutiens qu'ils ont consentis à mon égard. Liliane et Sarah.*

*A mon cher binôme Salma, ainsi que sa famille.*

*A tous mes collègues et ceux qui me connaissent.*

*Souhila*

Liste des Abréviations

Liste de figures

Liste des Tableaux

Introduction..... 1

**Partie I**

**Chapitre I : Synthèse bibliographique**

I.1	Les légumes et leurs bienfaits .....	5
I.1.1	Brocoli ( <i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>italica</i> ) .....	5
I.1.2	Tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.).....	6
I.1.3	Céleri ( <i>Apium Graveolens</i> ).....	6
I.1.4	Oignon ( <i>Allium cepa</i> ).....	7
I.1.5	Pomme de terre ( <i>Solanum tuberosum</i> L.).....	8
I.1.6	Carotte ( <i>Daucus carota subsp. sativus</i> ).....	8
I.2	Le séchage.....	9
I.2.1	L'utilisation de séchage dans le domaine agro-alimentaire .....	9
I.2.2	Technique de séchage conventionnelle (naturelle) .....	10
I.2.3	Technique de séchage moderne.....	10
I.2.4	L'activité d'eau .....	11
I.3	Soupes déshydratées .....	11
I.3.1	Définitions.....	11
I.3.2	Bienfaits des soupes .....	12
I.3.3	Avantages des soupes déshydratées .....	13
I.4	Plans d'expériences et Optimisation .....	13
I.4.1	Plan de mélange (D-optimal) .....	14
I.4.2	Application du plan de mélange dans le domaine alimentaire et cosmétique .....	14

**Partie II**

**Chapitre II : Matériel et méthodes**

<b>II.</b>	<b>Matériel et méthodes.....</b>	<b>17</b>
II.1	Criblage phytochimique des légumes étudiés.....	17
II.2	Optimisation de la soupe déshydratée .....	17
II.2.1	Plan de mélange (D-optimal).....	17
II.2.2	Les facteurs et niveaux .....	18
II.2.3	Les réponses .....	18
II.3	Préparation des légumes.....	19
II.3.1	Évaluation Du taux d'humidité .....	20

II.3.2	Détermination de la teneur totale en cendres .....	20
II.4	Extraction assistée par ultrasons.....	21
II.5	Détermination des polyphénols totaux .....	22
II.6	Détermination de la teneur en flavonoïdes .....	22
II.7	Estimation en polysaccharides .....	22
II.8	Formulation de la soupe déshydratée .....	23
II.8.1	La valeur nutritive de la soupe déshydratée optimale .....	23
II.8.2	Réhydratation de la soupe .....	24
II.8.3	Etude comparative entre la soupe déshydratée optimale et une soupe commercialisée	24
II.9	Analyse Statistique.....	25

### Partie II

#### Chapitre III : Résultats et Discussion

<b>III.</b>	<b>Résultats et discussion .....</b>	<b>27</b>
III.1	Taux d'humidité.....	27
III.2	Criblages phytochimiques des légumes séchés .....	28
III.2.1	Teneur en cendre .....	28
III.2.2	Teneur en polysaccharides .....	29
III.2.3	Teneur en polyphénols .....	30
III.2.4	Teneur en flavonoïdes .....	31
III.3	Plan de mélange (D-optimal) .....	33
III.3.1	L'ajustement du modèle .....	33
III.3.2	Optimisation des proportions de mélange et validation du model .....	35
III.4	Formulation de soupe déshydratée .....	37
III.4.1	Réhydratation de soupe .....	38
III.4.2	Etude comparative entre une soupe déshydratée optimisée et une soupe témoin.....	38
<b>IV.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>40</b>
<b>Annexes</b>	<b>.....</b>	<b>44</b>
<b>Références bibliographique.....</b>		<b>47</b>

## *Liste des Abréviations*

**a<sub>w</sub>** : Activité d'eau

**ANOVA** : Analyse de la variance

**DAEU** : Département de l'agriculture des États-Unis

**DMD**: D-optimal mixture design

**DOE**: design of experiment

**DT2** : Diabète de type 2

**EAG/g** : Equivalent en Acide gallique par gramme

**EQ** : Equivalent en Quercétine

**Kcal** : kilocalories

**Kj** : kilojoule

**MCV** : Maladies cardiovasculaires

**MNT** : Maladies non transmissibles

**MS** : Matière sèche

**OMS** : Organisation mondial de la santé

**RP** : Rendement en polysaccharide

**rpm** : Rotation par minute

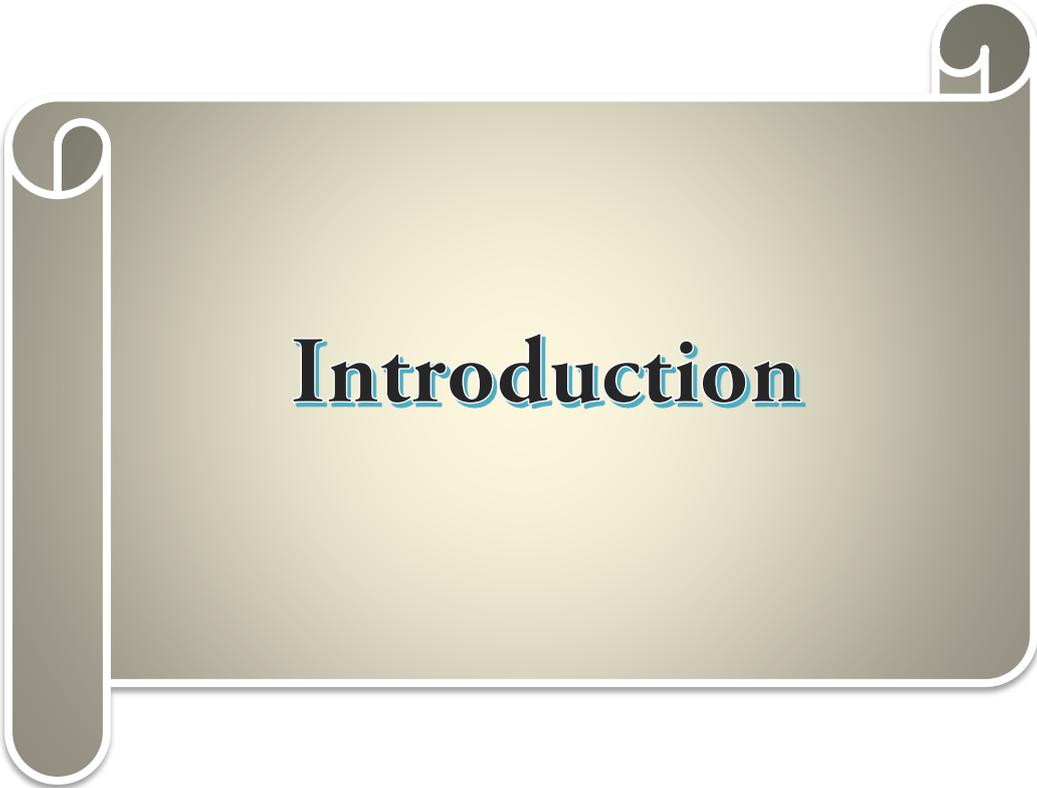
## *Liste de figures*

<b>Figure 1</b>   Anatomie du brocoli. ....	6
<b>Figure 2</b>   Image de la partie aérienne du céleri .....	7
<b>Figure 3</b>   Image du bulbe souterrain de l'oignon .....	7
<b>Figure 4</b>   Image des racines des carottes .....	9
<b>Figure 5</b>   Diagramme explicative de chemin de travail suivi dans notre étude. ....	17
<b>Figure 6</b>   Etape de séchage des légumes sélectionnée. ....	20
<b>Figure 7</b>   Cendres des différents légumes dans le four a moufle. ....	21
<b>Figure 8</b>   Extraction assistée par ultrasons des composées phénoliques des légumes étudiés. .....	21
<b>Figure 9</b>   Taux d'humidité des légumes étudiés.....	27
<b>Figure 10</b>   Teneur en cendre des légumes séchés. ....	29
<b>Figure 11</b>   Rendements d'extraction des polysaccharides bruts des différentes légumes .....	30
<b>Figure 12</b>   Teneur en polyphénols totaux des légumes séchés.....	31
<b>Figure 13</b>   Teneur en flavonoïdes des différentes légumes séchés. ....	32

<b>Figure 14</b>   Corrélation entre les réponses prédits et expérimentaux, <b>A</b> : corrélation entre la teneur en polyphénols expérimental et prédit, <b>B</b> : corrélation entre la teneur en flavonoïdes expérimental et prédit. ....	33
<b>Figure 15</b>   Profileur de prédiction des polyphénols et flavonoïdes simultanément en utilisant la fonction de désirabilité.....	36
<b>Figure 16</b>   Profileur de mélange des ingrédients utilisé pour maximiser le rendement des polyphénols et flavonoïdes. ....	36
<b>Figure 17</b>   Aspect de la soupe déshydratée optimisée et de la soupe témoin après réhydratation. ....	38

## *Liste des Tableaux*

<b>Tableau 1:</b> Différentes formulations des soupes déshydratées. ....	13
<b>Tableau 2:</b> Application du plan de mélange (D-optimal) dans le domaine alimentaire et pharmaceutique. ....	15
<b>Tableau 3:</b> Facteurs et leurs niveaux utilisés dans le plan de mélange (D-optimal).....	18
<b>Tableau 4:</b> Matrice utilisée dans le criblage des effets des légumes sur la teneur en polyphénols et flavonoïdes. ....	19
<b>Tableau 5:</b> Les teneurs en polyphénols et flavonoïdes des différentes formulations de légumes exécuté par le plan de mélange (D-optimal). ....	34
<b>Tableau 6:</b> Effets des légumes séchés sur la teneur en polyphénols et flavonoïdes. ....	35
<b>Tableau 7:</b> Composition chimique et nutritionnelle de la soupe optimisée et de la soupe témoin .....	37
<b>Tableau 8:</b> Composés bioactifs et la capacité antioxydante de la soupe optimisée et la soupe témoin .....	39



# Introduction

### *Introduction*

Les légumes apportent une contribution importante font partie de l'alimentation humaine. Plusieurs études montrent qu'une consommation élevée de légumes prouve une réduction remarquable des maladies cardiovasculaires (MCV) et éventuellement avec une réduction de l'obésité, du diabète de type 2, les maladies respiratoires chroniques et certains types de cancer (Li, Fan et al. 2014, Zhan, Liu et al. 2017). De plus, les bienfaits des légumes sur la prévention des maladies non transmissibles (MNT) peuvent s'expliquer par leur contenu relativement élevé de micronutriments, des composés antioxydants, des polyphénols et des fibres qui peuvent chacun inhiber un processus biochimique qui causent les MCV et autres MNT (Jiang, Zhang et al. 2013, Zhan, Liu et al. 2017). Selon la base de données alimentaire mondiale (1990–2010), la consommation des légumes (y compris les légumineuses) variait entre 35 à 493 g/Jour, avec une consommation moyenne de 209 g/Jour (van Buren, Grün et al. 2019).

Les légumes crus et les fruits représentent une activité d'eau très élevée et sont très sensibles aux dommages mécaniques, altérations microbiennes et conditions environnementales donc ils sont des produits périssables (Zhang, Chen et al. 2017). Le processus d'élimination de l'eau d'un fruit ou d'un légume est connu sous le nom de déshydratation (van Buren, Grün et al. 2019). La déshydratation est utilisée pour augmenter la stabilité du stockage des aliments car elle inhibe l'activité de l'eau, l'activité microbienne et est nécessaire pour limiter les modifications physiques et chimiques de la matrice (Sablani 2006).

La déshydratation des fruits et légumes est l'un des plus anciens modes de conservation des aliments connus, et elle comprend des établissements qui sèchent au soleil, lyophilisation, micro-onde des fruits et légumes (van Buren, Grün et al. 2019). La déshydratation des fruits et légumes réduit le poids et le volume du produit final, réduisant ainsi les coûts d'emballage, de stockage et d'expédition (Abdel-Haleem and Omran 2014). En outre, les avantages des repas déshydratés, en particulier des mélanges de soupes sèches, pourraient inclure une protection contre la détérioration enzymatique et oxydative ainsi qu'une stabilité du goût à long terme à température ambiante (Abdel-Haleem and Omran 2014).

Les soupes déshydratées de légumes ont gagné en popularité parmi les consommateurs du monde entier en raison à la grande variété de matières premières (fruits végétaux, tubercules, bulbes, légumes feuilles et légumineuses) (Chavan, Kumar et al. 2015). Elles peuvent être utilisées dans leur formulation qui a été reconnue comme une source saine de nutriments

principalement des protéines, des fibres alimentaires, d'autres glucides, des vitamines et des minéraux et des composés bioactifs qui pourraient aider à maintenir la santé et le bien-être du corps (Dhiman, Vidiya et al. 2017). Les soupes déshydratées sont bon marché et faciles à conserver et préparer à la maison, prêt à manger, elles sont très utiles dans la vie moderne qui modifie les habitudes de consommation actuelles (Fernández-López, Botella-Martínez et al. 2020).

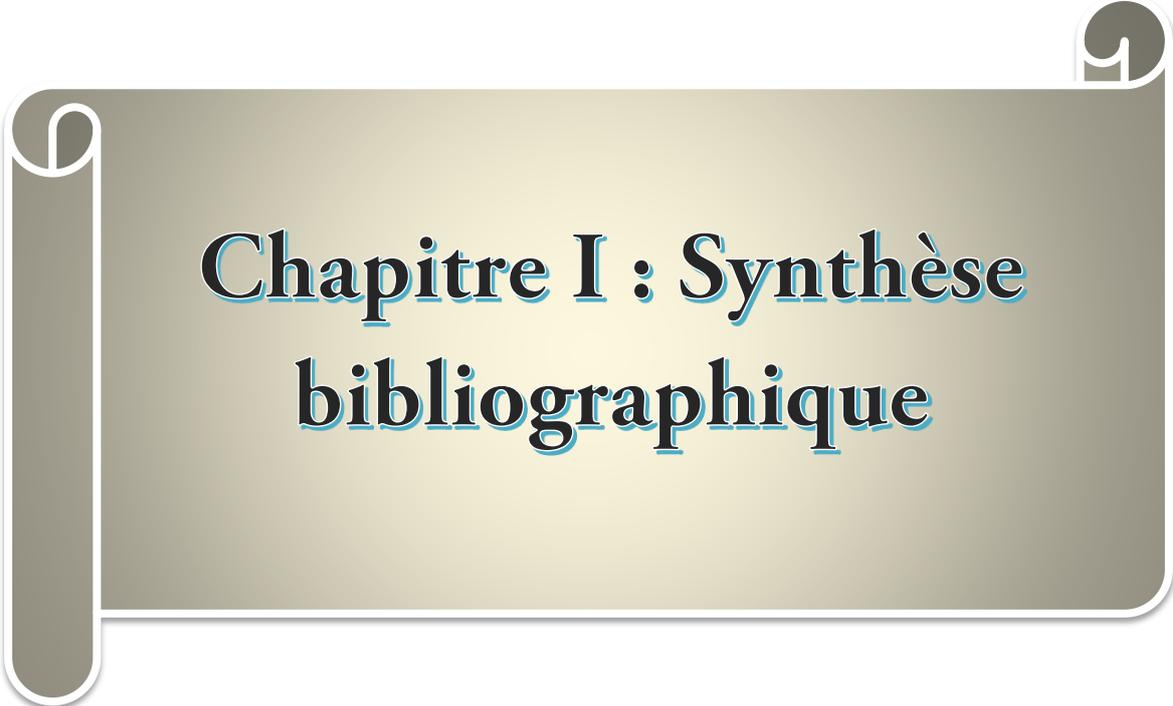
Le plan de mélange D-optimal (DMD) est une approche utile pour améliorer l'efficacité des processus de mélange complexes. S'il y a plusieurs facteurs et interactions dans l'expérience, la DMD peut être utilisée pour minimiser le nombre d'essais expérimentaux et fournir un outil utile pour explorer les composants ayant un impact sur le résultat escompté (Yu, Gleize et al. 2019). La réponse des expériences de mélange avec des variables de processus est influencée non seulement par les quantités des composants du mélange, mais également par les effets des variables de processus (Kowalski, Cornell et al. 2002).

Les gens mènent une vie stressante en raison de l'urbanisation. Ils n'ont pas assez de temps pour cuisiner et s'habituent à manger de la restauration rapide et autre (CHAUDHARI and SOLANKE 2016). En raison de leur teneur élevée en sucre, en gras et en sel, ainsi que de leur faible valeur nutritive en termes de teneur en protéines, en fibres, en vitamines et en minéraux, la majorité de ces aliments sont de la malbouffe (Upadhyay, Tiwari et al. 2017). La malnutrition et les maladies sont principalement liées à l'utilisation des aliments pauvres en nutriments et composés bioactifs (Farzana, Mohajan et al. 2017).

A cet égard, la présente étude basée sur l'utilisation du plan de mélange (D-optimal) pour l'optimisation d'une soupe déshydratée à base des légumes riches en composés bioactifs. En outre, la teneur en composés phénoliques totaux et en flavonoïdes, ainsi que l'activité antioxydante contre les radicaux libres (DPPH<sup>•</sup> et ABTS<sup>•</sup>) de la soupe déshydratée optimale obtenue ont été comparés avec une soupe témoin. La présente étude comporte deux grandes parties :

- La première partie de ce travail est consacrée pour une synthèse bibliographique sur généralités sur les bienfaits des légumes et des soupes déshydratées, les différentes techniques du séchage, et l'utilisation du plan de mélange dans les domaines alimentaire et cosmétique.
- La seconde partie représente la partie expérimentale qui traitera deux chapitres présentant le matériel et les méthodes utilisés pour le séchage des légumes sélectionnés

par la méthode conventionnelle (étuve ventilé) et la méthode non-conventionnelle (lyophilisation) et les méthodes employées pour la détermination de leur composition phytochimiques, ainsi que la procédure utilisée pour l'optimisation de la soupe déshydratée instantanée. et le deuxième chapitre traitera l'essentiel des résultats obtenus.



# Chapitre I : Synthèse bibliographique

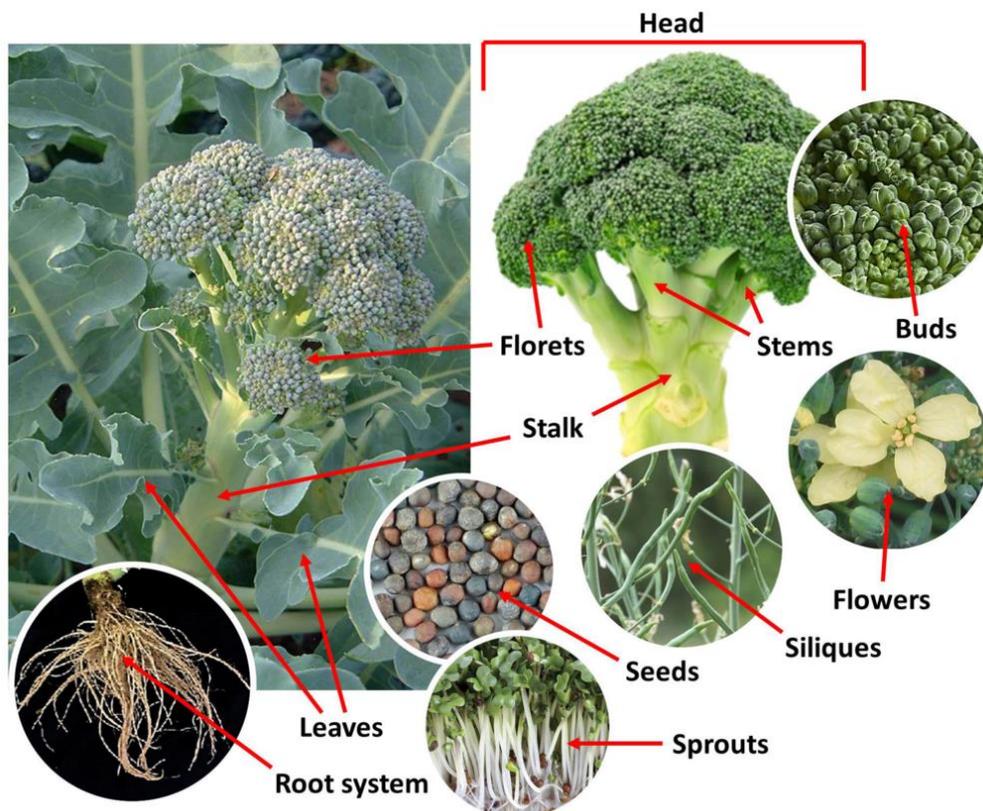
## I.1 Les légumes et leurs bienfaits

Les légumes sont de bonnes sources de fibres alimentaires, Trinidad, Mallillin et al. (2010) ont démontré que les fibres alimentaires ont d'importantes implications pour la santé dans la prévention des risques de maladies chroniques telles que le cancer et le diabète. Les légumes à haute teneur en fibres alimentaires pourraient être fermentés dans le côlon et produire des acides gras à chaîne courte tels que l'acétate, le propionate et le butyrate, qui améliorent l'absorption d'eau dans le côlon et préviennent ainsi la constipation (Mallillin, Trinidad et al. 2008). Ils ont démontré que le propionate inhibe l'activité de l'enzyme hydroxy-3-méthylglutaryl-CoA réductase, l'enzyme limitant la synthèse du cholestérol. Les fibres alimentaires montrent la capacité de se lier aux acides biliaires et empêchent leur réabsorption dans le foie, et inhibent ainsi la synthèse du cholestérol (Chen, Anderson et al. 1984, Trinidad, Mallillin et al. 2010).

En outre, de nombreuses données épidémiologiques ont montré une relation inverse entre la consommation des fruits et des légumes et les facteurs de risque liés aux maladies cardiovasculaires (Giugliano, Ceriello et al. 2006, Bazzano, Thompson et al. 2011). Les effets physiologiques des différents légumes varient considérablement par la différence dans la composition des polysaccharides, en particulier de la quantité et le type des fibres alimentaires, composition protéique et de la variabilité du contenu phytochimique (inhibiteurs d'enzymes, des phytohémagglutinines (lectines), des phytoestrogènes, des composés phénoliques (Bouchenak and Lamri-Senhadjji 2013). Plusieurs études ont été menées sur des légumes tels que le brocoli, l'oignon, la carotte, la pomme de terre, la tomate, ainsi que le céleri qui se sont révélés d'être d'excellentes sources de nutriments et de composés phénoliques.

### I.1.1 Brocoli (*Brassica oleracea L. var. italica*)

Le brocoli (*Brassica oleracea L. var. italica*) est une importante culture nutritive de légumes crucifères (Kumar and Srivastava 2016) (figure 1). Le brocoli est une excellente source de composés phytochimiques bénéfiques pour la santé y compris des composés bioactifs comme les dérivés azotés et soufrés (glucosinolates et isothiocyanates), polyphénols, minéraux et des vitamines (A, C, K et B<sub>6</sub>) qui présentent une activité antioxydante, anti-inflammatoire, anticancéreuse, antimicrobienne, et même une activité dans la régulation des troubles métaboliques, neuroprotecteur, et activités néphroprotectrices (Le, Chiu et al. 2020, Li, Xia et al. 2022).



**Figure 1** / Anatomie du brocoli (*Brassica oleracea* L., var. *Italica*) (Ilahy, Tlili et al. 2020).

### I.1.2 Tomate (*Solanum lycopersicum* L.)

La tomate (*Solanum lycopersicum*) est originaire de l'ouest de l'Amérique du Sud (Équateur, Pérou et Chili) (Kimura and Sinha 2008). Elle est considérée comme un aliment protecteur en raison de sa valeur nutritionnelle particulière, car elle fournit des nutriments importants tels que le lycopène, le bêta-carotène, les flavonoïdes, la vitamine C et les dérivés de l'acide hydroxycinnamique (Gerszberg, Hnatuszko-Konka et al. 2014). De plus, la tomate offre des propriétés anti-carcinogènes intéressantes grâce surtout à sa teneur en lycopène (une consommation abondante de tomates réduit le risque de développer un cancer colorectal jusqu'à 60 %, et celui du cancer du pancréas de 31 %) (Wuyts 2011).

### I.1.3 Céleri (*Apium Graveolens*)

Le céleri appartient à la famille des Apiacées, qui poussent sur tout le continent asiatique, en Europe et dans certaines régions d'Afrique au climat tropical (Khairullah, Solikhah et al. 2021) (figure 2). D'après Khairullah, Solikhah et al. (2021), Le céleri est classé comme suit :

Royaume: *Plantae*

Classe : *Dicotylédones*

Ordre : *Apiales*

Famille : *Apiacées*

Genre : *Apium*

Espèce : *Apium graveolens* L



**Figure 2** | Image de la partie aérienne du céleri (Khairullah, Solikhah et al. 2021).

Le céleri, grâce à leur composé bioactif tels que l'acide caféique, le *p*-coumarique acide, acide férulique, apigénine, lutéoline, tanin, saponine et kaempférol, montre de puissants propriétés antioxydants, pour éliminer les radicaux libres du stress oxydant (Kooti and Daraei 2017). Le céleri est l'une des sources les plus importantes en composés phytochimiques tels que des acides phénoliques, des flavonols et de vitamine C, le bêta-carotène (Provitamine A) et manganèse (Hedayati, Bemani Naeini et al. 2019). En outre, le céleri a été généralement utilisé dans le traitement de l'hypertension, de l'obésité, hyperlipidémie et maladies cardiovasculaires à cause de ses feuilles et ses graines qui ont de nombreuses substances comme 3-n-butylphthalide, lutéoline et l'apigénine (Kooti and Daraei 2017).

#### I.1.4 Oignon (*Allium cepa*)

L'oignon (*Allium cepa*) est une plante herbacée vivace avec une tige dans le bulbe souterrain, l'oignon a une teneur élevée en fibres alimentaires et en sucre et d'environ 90% d'eau, il contient un certain nombre de vitamines (B2, C, et B1), sélénium et potassium (Chakraborty, Uddin et al. 2022) (figure 3). L'oignon appartient à la famille des *Alliacées* est classé comme suit (Chakraborty, Uddin et al. 2022);

Royaume : *Plantae*

Division : *Magnoliophyta*

Classe : *Liliopsida*

Ordre : *Asperges*

Famille : *Alliacées*

Genre : *Allium*

Espèce : *A. cepa*



**Figure 3** | Image du bulbe souterrain de l'oignon (Galo, Morandim-Giannetti et al. 2021)

L'oignon est une herbe culinaire et médicinale présente une forte concentration de flavonoïdes comme la quercétine et le kaempférol, les alk(en)yl cystéine sulfoxydes dont le S-

méthyl cystéine sulfoxyde et le sulfoxyde de S-propyl cystéine, la cycloalliine, les thiosulfonates et les sulfures sont les principaux composés existant dans la plante. En outre, les constituants de l'oignon présentent des activités à large spectre y compris activité antioxydante, anti-inflammatoire, modificateur des lipides, anti-obésité, antihypertenseur et effets antidiabétiques (Galavi, Hosseinzadeh et al. 2021).

### **I.1.5 Pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.)**

La pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) est un aliment important et une culture légumière très populaire dans le monde, elle est également connue sous le nom de pomme de terre blanche ou irlandaise. C'est une plante herbacée annuelle dicotylédone dont les tiges souterraines donnent naissance à plusieurs tubercules, il s'agit d'une culture tubéreuse féculente du genre vivace *Solanum* de la famille des solanacées (Kumar and Chandra 2018). La pomme de terre est un aliment énergétique riche en glucides et pauvre en matières grasses, la teneur en protéines est assez faible mais a une bonne valeur biologique particulièrement riche en vitamine C et une bonne source de plusieurs vitamines B et de potassium (Camire, Kubow et al. 2009). Les polyphénols des pommes de terre comprennent les acides phénoliques et les pigments anthocyaniques colorés ; les anthocyanes sont rouges, bleues, et des pigments violets qui ont également des propriétés antioxydantes (McGill, Kurilich et al. 2013).

### **I.1.6 Carotte (*Daucus carota* subsp. *sativus*)**

La carotte (*Daucus carota* subsp. *sativus*) est appartient à famille des *Apiacées* (ombellifères) (Spooner 2019) (figure 4). En termes d'économie et de nutrition, la carotte est considérée comme le deuxième légume le plus populaire dans le monde après la pomme de terre (Spooner 2019). La carotte une espèce herbacée bisannuelle, fait partie de la famille des *Apiacées*, cette vaste famille comprend environ 445 genres et 3 700 espèce (Que, Hou et al. 2019). Les racines de réserve des carottes sont des bonnes sources de caroténoïdes, de vitamines et de fibres alimentaires, en minéraux et en antioxydants (Que, Hou et al. 2019). Les carottes sont des sources principales pour fournir les besoins humains quotidiens en Vitamine A (Gardner, Savard et al. 2001). Ainsi qu'elles sont riche en  $\beta$ -carotène qui fournit des propriétés anticancéreuses, protection contre les maladies cardiovasculaires et la prévention contre la cataracte (Fikselová, Šilhár et al. 2008).



**Figure 4** | Image des racines des carottes (Ehlert and Gabbert 1987).

## **I.2 Le séchage**

Le séchage (déshydratation) est une opération unitaire qui a été appliquée dans l'industrie alimentaire pour préserver les produits alimentaires (légumes et fruits) par la réduction de l'activité d'eau (Zhang, Chen et al. 2017). Le séchage est appliqué en deux étapes, dans la première étape ; l'humidité à l'intérieur du produit est amenée à la surface et séchée à l'air à un taux constant sous forme de vapeur d'eau, et l'étape secondaire implique une vitesse de séchage lente, dépend aux propriétés des produits alimentaires séché (Pirasteh, Saidur et al. 2014).

### **I.2.1 L'utilisation de séchage dans le domaine agro-alimentaire**

Les fruits et légumes sont des excellentes sources de nutriments essentiels tels que les vitamines, les minéraux, et les fibres, ils contiennent plus de 80 % d'humidité est classés comme aliments hautement périssables (Sagar and Suresh Kumar 2010). Ces produits ont une activité d'eau élevée et très sensibles aux dommages mécaniques et à la détérioration microbienne (Zhang, Chen et al. 2017). Aujourd'hui, le séchage est appliqué avec succès aux légumes et fruits car il réduit la teneur en humidité à des niveaux idéaux pour augmenter la durée du stockage et pour minimiser les modifications des propriétés physiques et chimiques des légumes et des fruits ainsi que la réduction substantielle de poids et volume qui réduisant ainsi les coûts d'emballage, de stockage, et de transport (Zhang, Chen et al. 2017).

Pendant le processus du séchage doit garder la qualité des aliments déshydratés par la rétention des substances aromatiques qui peut grandement affecter la qualité organoleptique des produits secs, et les nutriments en particulier sensibles à la chaleur et à l'oxygène telles que les vitamines A, C et la thiamine, et doit empêcher le brunissement pour maintenir la couleur (Sagar and Suresh Kumar 2010).

## **I.2.2 Technique de séchage conventionnelle (naturelle)**

### **I.2.2.1 Séchage à l'aire libre**

Le séchage à l'aire libre est le plus ancien moyen de conservation des produits alimentaires comme les fruits, les légumes (Wakjira 2010), les produits marins, et les plantes médicinales (Prakash and Kumar 2014), il est encore utilisé dans de nombreuses régions du monde. Les produits alimentaires étalés sur un sol, ou bien sur une terre compacte, ou un tapis (Ghosh and Venkatachalapathy 2014). Le séchage à l'aire libre effectué à des températures atmosphérique moyenne de 28 jusqu'à 46 °C et humidité relative inférieure à 60 %) au plusieurs jours (Babu, Kumaresan et al. 2018).

Le séchage à l'aire libre est utilisé le rayonnement solaire pour réchauffé les aliments et l'air ambiant pour augmentent le taux d'évaporation de l'eau de l'aliment, mais l'exposition directe des aliments au rayonnement ultraviolet de soleil causée des dommages au l'aliment séchés; perte de couleur, saveur et les valeurs nutritionnelles (Babu, Kumaresan et al. 2018). Les produits séchés à l'aire libre ont des qualités inférieures à la norme internationale, donc une surveillance continue tout au long de la période de séchage est nécessaire pour protéger les aliments séchés aux différentes contaminations lorsque le climat devient trop venteux, poussiéreux ou pluvieux (Babu, Kumaresan et al. 2018).

## **I.2.3 Technique de séchage moderne**

### **I.2.3.1 Lyophilisation**

La lyophilisation des fruits et des légumes est l'une des meilleures méthodes d'élimination de l'eau qui donne un produit final de haute qualité (Sagar and Suresh Kumar 2010). Ce processus de séchage se fait en trois étapes ; la congélation, dans laquelle le solvant à l'intérieur des pores est gelé en abaissant la température en dessous du point de congélation du solvant (Şahin, Özbakır et al. 2017), puis le séchage primaire de légumes dont l'eau est séparée de la phase soluté sous forme de glace lors de la congélation est éliminée par sublimation (Craig, Royall et al. 1999), c'est-à-dire l'eau passe de l'état solide à l'état gazeux (Sagar and Suresh Kumar 2010). Environ de 90% de l'eau présent dans les fruits et légumes est éliminé (Maisnam, Rasane et al. 2017). Le séchage par lyophilisation est fini par une étape de séchage secondaire où l'eau résiduelle des fruits et des légumes est adsorbée complètement, c'est-à-dire au cours de ce processus la fraction d'eau « non gelée » est retirée (Craig, Royall et al. 1999).

Le séchage par lyophilisation est réalisé à très basse température et pression (Zhang, Jiang et al. 2010), pour assurer la conservation de tous les composés thermolabiles des aliments ce

qui permet d'avoir à la fin un produit final a une valeur nutritionnelle élevée. Cette méthode permet de préservée les aliments séchés à longue durée jusqu'à 5 ans (Datta, Das et al. 2015), cette technique permet aussi de préserver la couleur et la structure des aliments séché (Zhang, Jiang et al. 2010).

### I.2.3.2 L'étuve

Le séchage par l'étuve est la technique la plus courante dans le séchage des fruits et des légumes (Mazandarani, Mirsaeidghazi et al. 2014), il utilise l'énergie thermique pour éliminer l'humidité des échantillons (Azwanida 2015), à l'aide d'un flux d'air sec circule dans l'étuve qui permet d'éliminer l'eau évaporé d'un aliment humide (Zhang and Scherer 2011), lorsque l'aliment séché atteint une masse constante le séchage est terminé (Zhang and Scherer 2011). De plus, le séchage à des températures élevées cause des dommages aux aliments séchés au niveau microstructural (Zhang and Scherer 2011), c'est-à-dire les paramètres de qualité tels que la couleur et les taux de réhydratation sont modifiés de manière significative avec l'augmentation de la température de séchage (Babu, Kumaresan et al. 2018).

### I.2.4 L'activité d'eau

La disponibilité de l'eau dans un produit particulier appelée « Activité d'eau », c'est un terme largement utilisé dans l'industrie alimentaire comme indicateur de la disponibilité en eau d'un produit dans lequel il est utilisé pour déterminer la durée de conservation et la qualité du produit alimentaire (Grant 2004).

L'activité d'eau ( $a_w$ ) dans le produit est définie par le rapport de pression de vapeur d'eau à la surface du produit ( $p$ ) à la pression de vapeur d'eau pure à la même température ( $p_0$ ) comme mentionné dans l'équation 1 (Grant 2004).

$$a_w = \frac{p}{p_0} \quad (1)$$

Avec  $P$  : Pression de vapeur d'eau à la surface du produit,  $P_0$  : La pression de vapeur d'eau pure à la même température.

## I.3 Soupes déshydratées

### I.3.1 Définitions

La soupe déshydratée c'est une soupe avec des ingrédients ou des légumes secs mélangés qui peut être consommé après reconstitution avec de l'eau chaude, on distingue deux types ; soupe maison (faite à la maison avec des ingrédients frais sans passer par séchage des

ingrédients et soupe conditionnée (soupes humides ou sèches fabriquées par l'industrie, emballé dans des cartons, des canettes ou des sachets) (van Buren, Grun et al. 2019).

D'après l'DAEU (Département de l'agriculture des États-Unis), les soupes de légumes déshydratées peuvent également être divisées en trois catégories selon les définitions suivantes ;

**Soupe Type 1-rapide** : elle peut être préparée en mijotant dans de l'eau bouillante pendant 5 minutes (Elrih and Ismael 2020).

**Soupe Type 11 - Soupe instantanée** : Reconstituer dans de l'eau bouillante pendant environ une minute (Elrih and Ismael 2020).

**Soupe à cuisson lente de type 111** : Entièrement reconstituée dans de l'eau bouillante pendant plus de 40 minutes (Elrih and Ismael 2020).

### I.3.2 Bienfaits des soupes

Ces dernières années, les consommateurs se sont davantage intéressés aux aliments ayant à une valeur pour la santé, en général, l'origine des ingrédients, la formulation du produit et la méthode de traitement utilisée peut affecter le choix des consommateurs (Bukya, Shete et al. 2018).

Le cas de la soupe qu'est en plus de la fonction de base de fournir une nutrition, les aliments fonctionnels offrent également des bienfaits physiologiques tels que la prévention de plusieurs maladies. Les composants fonctionnels des aliments sont généralement classés sous six groupes, à savoir ; les glucides fonctionnels comme les oligosaccharides, des protéines fonctionnelles comme les lipoprotéines et les glycoprotéines et peu de peptides fonctionnels, des lipides fonctionnels, des isoprénoïdes et composés phénoliques, prébiotiques et probiotiques et minéraux et micronutriments, chacun de ces composants joue un rôle important dans l'amélioration de la santé ou sa régulation (Sugumar and Guha 2020).

En outre, une alimentation équilibrée devrait fournir d'autres éléments non nutritifs tels que des fibres alimentaires, des antioxydants et des composés phytochimiques. Plusieurs études ont confirmé que les antioxydants tels que les vitamines C et E, le  $\beta$ -carotène, la riboflavine et le sélénium protègent le corps humain aux dommages des radicaux libres du stress oxydatif (Sablani 2006, Thuy, Hang et al. 2019).

Pour cela une consommation élevée de la soupe à base de légumes est associée à une prévention des maladies cardiovasculaires, le diabète de type 2 (DT2) (Li, Fan et al. 2014), maladie respiratoire chronique et certains types de cancer et réduction de l'apport calorique qu'est inversement corrélé au risque d'obésité (Rolls, Fedoroff et al. 1990, Kuroda and Ninomiya 2020) (Liu 2013).

### I.3.3 Avantages des soupes déshydratées

Les aliments déshydratés, en particulier les mélanges de soupes sèches, présentent des avantages majeurs de la protection contre détérioration enzymatique et oxydative et stabilité de la saveur pour une longue période (6 à 12 mois) (Elrih and Ismael 2020). Aussi, ils n'ont pas besoin de réfrigérateur et ont une valeur assez nutritive en tant que source de protéines (Elrih and Ismael 2020). De plus, ils sont prêts à être reconstitués en peu de temps pour les familles ouvrières, hôtels, hôpitaux, restaurants et utilisation institutionnelle ainsi que pour rations militaires (Abdel-Haleem and Omran 2014). Les soupes exercent des poids légers pour l'expédition et disponibilité à tout moment de l'année. Le tableau ci-dessous représente différentes formulations de soupes déshydratées de fruits et de légumes séchés.

**Tableau 1:** Différentes formulations des soupes déshydratées.

<b>Formule de soupe</b>	<b>Ingrédients</b>	<b>Références</b>
La formulation de soupe de petit pois instantané	pois verts var, Pusa Shri, navet, carotte et oignon	(Hanan, Rudra et al. 2020)
La soupe au légume complété avec des fruits de pomme	Pomme, carottes, poivron, oignon, ail, clou de girofle, poudre de maïs, coriandre, purée de tomate, poivre poudre, sel, huile, piment.	(Bukya, Shete et al. 2018)
Soupe Végétarienne Séchée complété avec quelques légumineuses	Orge décortiquée, pois vert, pois chiche, lentille, pommes de terre, tomates, carotte, oignon, ail, poivre noir, coriandre, sel et cumin.	(Abdel-Haleem and Omran 2014)

### I.4 Plans d'expériences et Optimisation

C'est une méthode statistique permet d'organiser au mieux les essais qui accompagnent une recherche scientifique (Goupy 2006). La théorie des plans d'expérience assure des

conditions pour obtenir une meilleure précision possible avec minimum d'essais et réduisent en maximum les erreurs (Goupy and Creighton 2013). Le plan d'expérience est une approche qui étudie l'impact de deux facteurs ou plus sur une réponse ou des réponses (Mehdizadeh Allaf and Trick 2019). L'application de plan d'expérience débute du 20<sup>ème</sup> siècle dans le domaine agricole, et dans le domaine, aussi il est appliqué dans les recherches médicales et pharmaceutiques pour formuler des produits ou de molécules susceptibles d'avoir des effets thérapeutiques (Dagnelie 2008).

#### **I.4.1 Plan de mélange (D-optimal)**

L'optimisation de la composition du mélange pour obtenir des produits avec les caractéristiques requises est l'un des problèmes communs dans la pré-formulation des produits alimentaires et cosmétiques (Samson, Basri et al. 2016). Plusieurs modèles d'expériences sont utilisés pour optimiser les compositions de mélange afin d'obtenir des propriétés souhaitables, comme la méthode de surface de réponse, Box Behnken et le plan de mélange (D-optimal) (Samson, Basri et al. 2016).

Le plan de mélange (D-optimal) est une technique efficace pour optimiser les processus de mélange complexes (Xie, Wang et al. 2018). Le plan est devenu plus attirant dans l'optimisation de la formulation des produits alimentaire et cosmétique en raison de ses avantages ; en réduisant le nombre d'essais expérimentaux et en fournissant un outil efficace pour étudier les aspects affectant la réponse souhaitée (Yu, Gleize et al. 2019). Ce plan joue un rôle important dans la prise en compte de chacun des facteurs et de leur niveau dans tout problème de recherche et est utilisée pour localiser les plus grandes situations expérimentales (Sahu and Patel 2021). De plus, le plan de mélange (D-optimal) minimise la variance associée à l'évaluation des coefficients dans un modèle et produit une meilleure combinaison possible en considérant les critères de maximisation (déterminants) de la matrice d'information (Yeom, Song et al. 2015).

#### **I.4.2 Application du plan de mélange dans le domaine alimentaire et cosmétique**

De nos jours, le plan du mélange (D-optimal) a été adopté pour optimiser les formulations cosmétiques et alimentaires telle que les émulsions cosmétiques, la formulation de savon et de rouge à lèvres (Sulaiman, Basri et al. 2016, Yahya, Wahab et al. 2022). Le tableau ci-dessous représente les principales applications du mélange (D-optimal) dans plusieurs domaines.

**Tableau 2:** Application du plan de mélange (D-optimal) dans le domaine alimentaire et pharmaceutique.

Applications	Référence
Formulation de comprimés d'Okara comme complément alimentaire	(Mohamad Zen, Abd Gani et al. 2015)
Développement d'un système de nano-émulsion contenant du peptide de cuivre	(Samson, Basri et al. 2016)
Développement d'un système de nano-émulsion contenant de l'extrait de feuilles de <i>Clinacanthus nutans</i> (L.) pour un système d'administration transdermique	(Sulaiman, Basri et al. 2016)
Formulation de sauces à base de tomates à haute teneur en Z-lycopène et haute bioaccessibilité au lycopène total	(Yu, Gleize et al. 2019)
Détermination de la formulation de sucre qui maximise la durée de conservation et la teneur en humidité critique des bonbons durs	(Spanemberg, Korzenowski et al. 2019)
Produire une pâte athlétique par l'ajout de diverses sources de protéines	(Kamali Rousta, Ghandehari Yazdi et al. 2020)



*Chapitre II : Matériel &  
méthodes*

## II. Matériel et méthodes

Ce présent travail visait à formuler une soupe déshydratée qui offre des bénéfices potentiels pour la santé, l'étude a été divisée en deux grandes étapes, la première étape était le criblage et la détermination des composés majeurs présents dans les légumes (brocoli, céleri, pomme de terre, oignon, carotte, tomate) (Figure 1). Afin de fournir des soupes déshydratées potentielles à haute teneur en polyphénols et en flavonoïdes, un plan de mélange (D-optimal) a été utilisé pour cribler les effets des facteurs linéaires et optimiser les proportions des légumes qui pouvant offrir une teneur élevée en composé bioactifs (Figure 5). En outre, la valeur nutritionnelle (teneur en protéines, lipides, polysaccharides, cendres, phénoliques et flavonoïdes) et l'activité antioxydant du produit final de la soupe formulée ont été déterminées pour les comparer avec une soupe témoin.

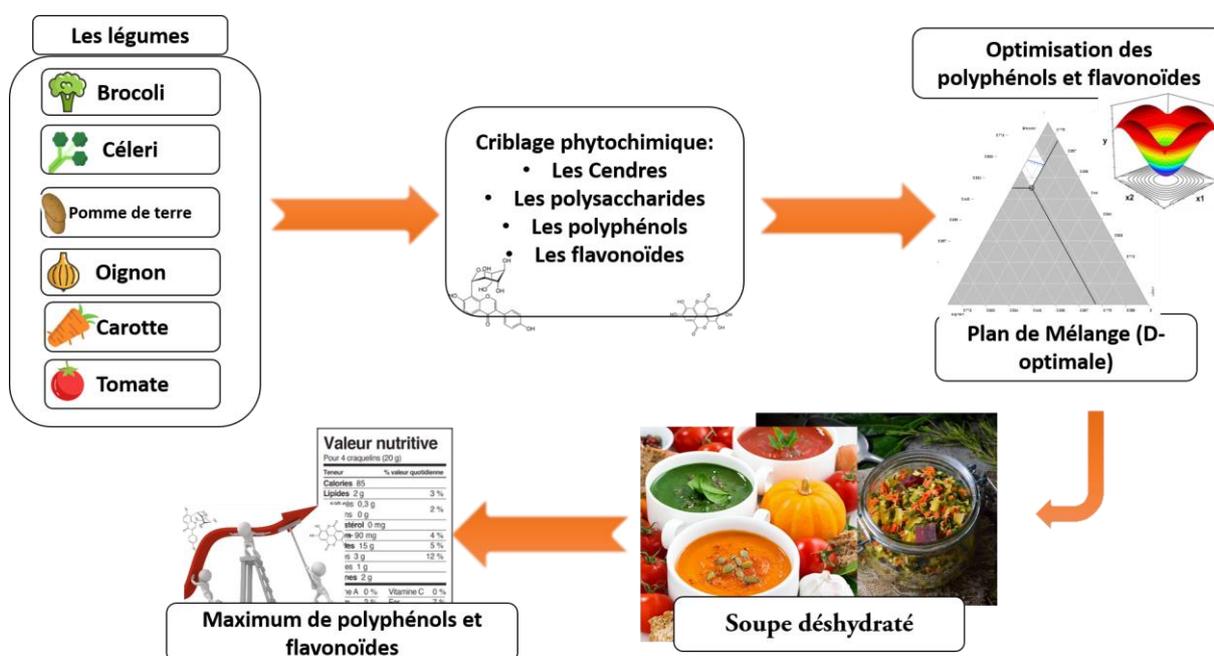


Figure 5 | Diagramme explicatif de chemin de travail suivi dans notre étude.

### II.1 Criblage phytochimique des légumes étudiés

Dans cette étude, six légumes tels que le brocoli, le céleri, la pomme de terre, l'oignon, la carotte, et la tomate ont été étudiés en évaluant leurs teneurs en cendres, polysaccharides, phénoliques et flavonoïdes dont tous les protocoles utilisés sont mentionnés ci-dessous.

### II.2 Optimisation de la soupe déshydratée

#### II.2.1 Plan de mélange (D-optimal)

Il existe de nombreux types de plan de mélange : plans en réseaux, plans de mélanges centrés, et plan D-optimal. Dans cette étude, un plan de mélange (D-optimal) a été utilisé pour étudier

l'effet de chaque légume séché dans un ensemble de légumes (ingrédients) sur la teneur totale en composés phénoliques et en flavonoïdes. Le plan D-optimal est construit pour minimiser la variance globale du coefficient de régression prédit en maximisant la valeur du déterminant de la matrice d'information (Giugliano, Ceriello et al. 2006). De plus, les variables combinées de mélange et de processus peuvent être utilisées dans le même plan d'expérience (Giugliano, Ceriello et al. 2006). Dans les expériences avec des mélanges, la valeur d'un facteur est sa proportion dans le mélange, qui se situe entre zéro et un. La somme des proportions dans n'importe quelle recette de mélange est un (100%). Avec les mélanges, il est impossible de faire varier un facteur indépendamment de tous les autres. Lorsque vous modifiez la proportion d'un ingrédient, la proportion d'un ou plusieurs autres ingrédients doit également changer pour compenser

### II.2.2 Les facteurs et niveaux

Les domaines d'études des paramètres (légumes séchés) pour le plan de mélange (D-optimal) ont été préparés à l'aide du logiciel JMP 13 Pro, comme indiqué dans le tableau 4. Cinq facteurs indépendants ont été étudiés : proportion de brocoli, proportion d'oignon, proportion de céleri et proportion de mélanges de légumes (tomate (1/3): pomme de terre (1/3) : carotte (1/3)) et proportion de sels.

**Tableau 3:** Facteurs et leurs niveaux utilisés dans le plan de mélange (D-optimal).

Niveaux codés	0	1
Brocoli	0,4	0,69
Oignon	0,1	0,2
Céleri	0,1	0,2
Mélange de légumes	0,1	0,39
Salinité (NaCl)	0,01	0,1

### II.2.3 Les réponses

Deux réponses ont été examinées : les composés phénoliques totaux et la teneur en flavonoïdes. Pour cinq variables, 15 formulations ont été générées avec différentes compositions de chaque ingrédient, comme indiqué dans le tableau 2.

**Tableau 4:** Matrice utilisée dans le criblage des effets des légumes sur la teneur en polyphénols et flavonoïdes.

Essais	Brocoli	Oignon	Céleri	Mélange de légumes	Salinité (NaCl)
1	0,4	0,1	0,1	0,3	0,1
2	0,4	0,1	0,1	0,39	0,01
3	0,4	0,1	0,1	0,39	0,01
4	0,4	0,2	0,1	0,2	0,1
5	0,4	0,2	0,2	0,19	0,01
6	0,4	0,2	0,2	0,19	0,01
7	0,5	0,1	0,2	0,1	0,1
8	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1
9	0,5	0,1	0,2	0,1	0,1
10	0,59	0,2	0,1	0,1	0,01
11	0,69	0,1	0,1	0,1	0,01
12	0,69	0,1	0,1	0,1	0,01
13	0,480	0,144	0,144	0,180	0,0503
14	0,480	0,144	0,144	0,180	0,0503
15	0,480	0,144	0,144	0,180	0,0503

**mg EAG/g** : mg équivalent acide gallique par gramme, **mg EQ/g** : mg équivalent quercétine par gramme

### II.3 Préparation des légumes

Différents légumes (carotte, céleri, brocoli, pomme de terre, oignon, tomate) ont été nettoyés et lavés plusieurs fois par l'eau de robinet suivie par l'eau distillée pour éliminer l'excès de la poussière et les impuretés et blanchis à l'eau chaude à 95°C pendant 5 min puis lavés à l'eau froide selon (Abdel-Haleem and Omran 2014). Ensuite, les légumes ont été coupés en rondelle de 1 à 2 mm de diamètre. Tous les légumes ont été séchés dans une étuve ventilée à 40 °C jusqu'à l'obtention d'un poids constant, seuls les tomates et les pommes de terre ont été séchés par lyophilisation (figure 6).



**Figure 6** | Etape de séchage des légumes sélectionnée.

Après séchage, les légumes ont été finement broyés à l'aide d'un broyeur électrique afin d'obtenir des poudres fines. Les poudres des légumes ainsi obtenues ont été tamisées avec un tamis de 200  $\mu\text{m}$ , puis conservée dans des flacons en verre hermétiquement fermés, à l'abri de l'humidité et de la lumière.

### II.3.1 Évaluation Du taux d'humidité

La détermination du taux d'humidité a été effectuée en utilisant le protocole décrit par Horwitz, Chichilo et al (1970). Brièvement, 5g des échantillons des légumes frais ont été pesés et déposés dans l'étuve ventilé (Mettler, D39263/D39264, B319.0656, Allemagne) à 105°C. La différence de poids après séchage a été utilisée pour calculer la teneur en humidité en utilisant l'équation 2 :

$$\text{Taux d'humidité (\%)} = \frac{W_I - W_F}{W_I} \times 100 \quad (2)$$

$W_F$ : Poids final après séchage (g) et  $W_I$  poids de l'échantillon (g).

### II.3.2 Détermination de la teneur totale en cendres

Les cendres des différents légumes, et de la soupe déshydratée ont été calculées selon le protocole décrit par Horwitz, Chichilo et al (1970). En bref, 1 g de chaque poudre de légumes ou soupes déshydraté ont été met dans un creuset en porcelaine et placer dans four a moufle contrôlé préchauffé à 600 °c. Après 5 h, les creusets directement ont été placés dans le dessiccateur pour le refroidissement (figure 7). Les étapes mentionnées ci-dessus ont été répété 3 fois pour chaque légume et soupe. Les cendres (%) ont été calculées en utilisant l'équation 3.

$$\text{Cendre (\%)} = \frac{M_c}{M_L} * 100 \quad (3)$$

Où  $M_c$  c'est la masse de la cendre après 5 h,  $M_L$  c'est la masse de légumes (g)



**Figure 7** | Cendres des différents légumes dans le four à moufle.

#### II.4 Extraction assistée par ultrasons

Les extraits phénoliques-flavonoïdes de différents légumes et de la soupe déshydratée ont été extraits à l'aide d'un sonicateur en utilisant éthanol-eau 55 % comme solvant d'extraction. Les mélanges de poudre-solvant (1/30 g/mL) ont été mis au bain ultrasons pendant 30 min à 60 °C de température. La fréquence et la puissance sonicateur ont été fixées respectivement à 40 kHz et 120 W. À la fin de l'extraction, les extraits éthanoliques obtenus ont été filtrés en utilisant la centrifugation (5000 rpm, 10 min) suivie par filtration à l'aide d'un papier wattman, puis les extraits liquides ont été stockés à 4 °C jusqu'à leur utilisation pour des analyses ultérieures (figure 8).



**Figure 8** | Extraction assistée par ultrasons des composées phénoliques des légumes étudiés.

### II.5 Détermination des polyphénols totaux

Les composés phénoliques totaux des légumes sélectionnés et de la soupe obtenue ont été déterminés à l'aide de la méthode spectrophotométrique décrite par Moussa, Dahmoune et al. (2022). 625 µL de réactif de Folin-Ciocalteu dilué (1/10 V/V) ont été ajoutés aux différents extraits éthanoliques des légumes (125 µL). Le mélange a été laissé pendant 2 min à température ambiante, puis 500 µL de solution de carbonate de sodium (7,5 %) ont été ajoutés. Le mélange a été incubé pendant 30 min à une température ambiante à l'abri de lumière, L'absorbance des mélanges réactionnels a été mesurée à 760 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-vis (Optizen pop, Corée). Les concentrations des polyphénols des différentes légumes ont été calculées à l'aide de la courbe d'étalonnage de l'acide gallique ( $y = 12,089X + 0,0034$ ,  $R^2 = 0,999$ ) et les polyphénols ont été exprimés en mg d'équivalent d'acide gallique par g en utilisant équation 4.

$$\text{Polyphénols (mg EAG/g)} = \frac{\text{mg}_{\text{EAG}}/\text{mL} * \text{volume}_{\text{Extract}} * \text{facteur de dilution}}{\text{g}_{\text{légumes}}} \quad (4)$$

### II.6 Détermination de la teneur en flavonoïdes

Les teneurs en flavonoïdes des extraits de légumes et de la soupe obtenue ont été estimée par la méthode Moussa, Dahmoune et al. (2022). En bref, 0,5 mL d'extrait de légumes a été ajouté à 0.5 ml de solution de chlorure d'aluminium ( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) de 2 % préparé dans méthanol. Les absorbances ont été mesurées à 430 nm après 10 min d'incubation à température ambiante contre un blanc contient (0,5 mL d'extrait de légumes + 0,5 mL d'éthanol), puis la teneur en flavonoïdes de chaque légume et de la soupe déshydraté à l'aide de la courbe d'étalonnage de la quercétine ( $y=38,425x + 0,0037$  avec  $R^2= 0,998$ ). La teneur en flavonoïdes a été calculées par l'équation 5 et exprimées en mg EQ/100 g

$$\text{Flavonoïdes (mg EQ/g)} = \frac{\text{mg}_{\text{EQ}}/\text{mL} * \text{Volume}_{\text{Extract}} * \text{Facteur de dilution}}{\text{g}_{\text{légumes}}} \quad (5)$$

### II.7 Estimation en polysaccharides

Les extraits aqueux des légumes et de la soupe déshydratée ont été obtenus en utilisant bain à ultrasons comme technique d'extraction. Les paramètres d'extraction étaient 1/30 g/mL de solide/solvant ratio, 30 min de temps d'extraction, et 60 °C de température. Deux volumes d'éthanol à 95 % ont été ajoutés aux extraits aqueux des différents légumes pour précipiter les polysaccharides. Le mélange a été conservé une nuit au réfrigérateur à 4°C pendant 24 h. Lorsque le précipité s'est déposé sous forme de masse fibreuse, les polysaccharides ont été

centrifugé (5000 rpm, 10 min) et le surnageant a été retiré, et les polysaccharides ont été lavés plusieurs fois par éthanol et les récupérés sous forme de solide brut (Abbou, Kadri et al. 2019). Le rendement en polysaccharides (RP %) a été calculé par l'équation 6.

$$RP (\%) = \frac{M_p}{M_L} * 100 \quad (6)$$

Où  $M_p$  est la masse (g) de polysaccharides obtenus,  $M_L$  c'est la masse de légume en (g).

## II.8 Formulation de la soupe déshydratée

La formulation de la soupe déshydratée a été réalisée, en basant sur les ingrédients optimaux (formulation optimale) qui présentaient une teneur élevée en composés phénoliques et flavonoïdes obtenus à partir du plan de mélange (D-optimal).

### II.8.1 La valeur nutritive de la soupe déshydratée optimale

L'objectif de cette étude est d'évaluer la valeur nutritionnelle de notre soupe déshydratée optimisée et de la comparer avec une soupe témoin (tableau A.2).

L'isolat de protéine de la soupe a été extrait en utilisant la technique d'extraction alcaline-précipitation isoélectrique, comme décrit par Gao, Shen et al. (2020), avec des minimales modifications. En bref, 2 g de soupe en poudre ont été dispersés dans l'eau à un rapport de 1:30 (w/v) et le pH a été rapidement ajusté à une valeur de 9,0 (en utilisant une solution de NaOH 1,0 M), après la solution a été agitée à 600 rpm pendant 60 min à l'aide d'un agitateur magnétique, A la fin de l'extraction, le surnageant a été recueilli après une centrifugation à 6000 rpm pendant 20 min. Afin de récupérer l'isolat de protéine de la soupe optimale, le pH de l'extrait a été ajusté à pH de 4,5 (en utilisant HCl 0.1 N) pour précipiter la fraction protéique. Le précipité a été recueilli et remis en suspension dans l'eau et le pH a été ajusté à 7,0 et lyophilisé (CHRIST, 22645, Germany) pendant 48 h. La formule suivante a été utilisé pour exprimer la teneur en protéine de l'échantillon comme :

$$\text{Teneur en protéine (\%)} = \frac{W_2}{W_1} \times 100 \quad (7)$$

Où,  $W_1$  = la masse de la poudre de la soupe déshydratée (g),  $W_2$  = la masse de protéine après lyophilisation (g),

Pour l'estimation de la teneur en matières grasses de soupe déshydratée, le protocole décrit par Horwitz, Chichilo et al (1970). L'extraction a été réalisée avec du n-hexane comme solvant d'extraction. En bref, 5 g d'échantillon ont été conditionnés dans une cartouche placée à

l'intérieur d'un dispositif d'extraction de soxhlet. La soupe optimale a été extraite pendant 6 h à la température d'ébullition du solvant (69 °C). La proportion de solvant était de 150 ml dans un ballon Soxhlet de 250 mL.

La formule suivante a été utilisée pour exprimer la teneur en matières grasses de l'échantillon comme :

$$\text{Lipide, \% de solvant} : \frac{W_2 - W_3}{W_1} \times 100 \quad (8)$$

Où,  $W_1$  = masse de l'échantillon (g),  $W_2$  = masse du ballon à fond plat avec l'échantillon (g),

$W_3$  = Masse du ballon à fond plat vide (g).

La valeur énergétique a été calculée par la méthode d'Edith, Lacina et al. (2020) avec des modifications par l'application des coefficients thermiques : 1 g de glucide fournit 4 Kcal; 1 g de protéine fournit 4 Kcal ; 1 g de lipide fournit 9 Kcal. A partir de ces données, la somme des valeurs énergétiques des éléments nutritifs est calculée pour obtenir la valeur énergétique de l'aliment considéré. Ainsi, pour 100 g d'aliment, la valeur énergétique a été exprimée comme suit :

$$\text{Valeur énergétique (Kilocalorie)} = [4 \times \text{proteine (\%)}] + [4 \times \text{glucides totaux (\%)}] + [9 \times \text{lipides (\%)}] \quad (9)$$

## II.8.2 Réhydratation de la soupe

Le taux de réhydratation de la soupe a été calculé à l'aide de la procédure décrite par Hanan, Rudra et al. (2020) avec quelques modifications. 1g de soupe déshydratée optimal a été mélangé avec 10 mL d'eau distillée et met au bain marie à une température de  $80 \pm 2$  °C. La soupe réhydratée est ensuite centrifugée à vitesse constante (3000 g/20 minutes). Le taux de réhydratation a été calculé en divisant le poids des échantillons réhydratés par le poids sec de l'échantillon.

## II.8.3 Etude comparative entre la soupe déshydratée optimale et une soupe commercialisée

### II.8.3.1 Evaluation de l'activité antioxydante

Pour but de faire une étude comparative entre la soupe déshydratée optimale et témoin, la capacité antioxydante des extraits de deux soupes ont été évaluée en utilisant l'activité anti-radicalaire de contre les radicaux libres (DPPH<sup>•</sup>, ABTS<sup>•</sup>).

La capacité de piégeage des radicaux libres DPPH<sup>\*</sup> des extraits de deux soupes a été déterminée par le protocole utilisé par Moussa, Dahmoune et al. (2022) avec quelques modifications. En termes simples, 50 µL d'extraits des soupes ont été mélangé avec 1950 µL de solution de DPPH (60 µM) préparé dans le méthanol, puis les mélanges ont été incubés pendant 30 minutes à température ambiante dans l'obscurité. L'absorbance a été mesurée à 517 nm avec un spectrophotomètre UV-vis. La capacité antioxydante de la soupe déshydratée et commercialisé le radical libre DPPH<sup>\*</sup> a été calculé selon l'équation 10.

Le test ABTS a été réalisé basé sur le test utilisé par Moussa, Dahmoune et al. (2022), et il était basé sur la décoloration du radical libre ABTS<sup>\*</sup> en présence d'antioxydants. 7 mM d'ABTS et 2,45 mM de persulfate de potassium ont été utilisés pour préparer une solution mère d'ABTS. Après une période d'incubation de 16 heures dans l'obscurité, la solution mère a été diluée avec de l'éthanol jusqu'à une absorbance finale de 0,700 à 734 nm, 2 ml de solution ABTS diluée a été ajoutés à 20 µL d'extraits de soupe. Après 6 minutes dans l'obscurité, la capacité antioxydant (%) a été mesurée à 734 nm.

$$\text{Inhibition des radicaux libres (\%)} = \frac{A_{\text{CONTROL}} - A_{\text{ECHANTILLON}}}{A_{\text{CONTROL}}} \times 100 \quad (10)$$

## II.9 Analyse Statistique

Le JMP® Pro 13.0.0 (64 bits) a été utilisé pour construire le plan de mélange et analyser tous les résultats. Le logiciel GraphPad Prism 8.0.2 (263) a été utilisé pour tracer tous les graphs et l'analyse de la variance (Test de Tukey).



*Chapitre III : Résultats  
et Discussion*

### III. Résultats et discussion

#### III.1 Taux d'humidité

Les Légumes et les fruits frais est une source importante de nutriments alimentaires essentiels tels que les vitamines, les minéraux et sont classés comme denrées hautement périssables car la teneur en humidité des fruits et légumes frais est supérieure à 80% (Changrue, Raghavan et al. 2006).

D'après la figure 9, le taux d'humidité des légumes étudiées à l'état frais est compris entre 80% et 95%, où la tomate présentait de taux de  $94,28 \pm 0,54\%$ ; oignon de  $92,16 \pm 0,11\%$ , céleri de  $91,4 \pm 0,43\%$ , brocoli  $91,73 \pm 0,26\%$ , carotte de  $92,39 \pm 1,05\%$  respectivement. Cependant, la pomme de terre avait de taux d'humidité de  $82,37 \pm 0,33\%$ , cette valeur est inférieure par rapport à d'autres légumes. Kiranoudis, Maroulis et al. (1993) ont montré que la tomate a un taux d'humidité élevé (97%), ce résultat est supérieur au résultat obtenu dans cette étude, où la tomate présentait un taux d'humidité de 94%. De plus, les taux d'humidité de carotte et d'oignon rapporté dans littérature (90% pour carotte et 85% pour oignon) sont proches à des valeurs obtenues dans cette étude qui sont  $92,39 \pm 1,05\%$  et  $92,16 \pm 0,11\%$  pour carotte et d'oignon respectivement (Kiranoudis, Maroulis et al. 1993).

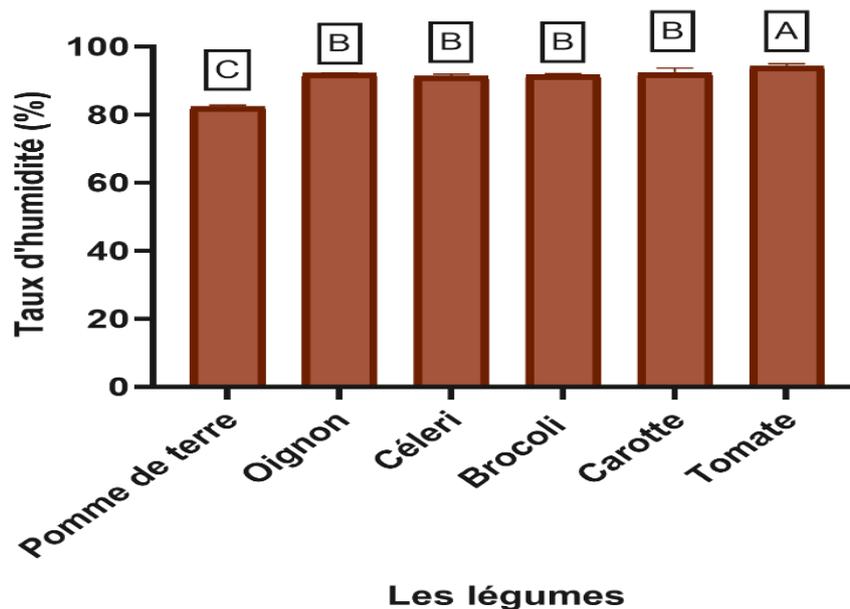


Figure 9 | Taux d'humidité des légumes étudiés

Des études montre que brocoli contient un taux d'humidité de  $89,36 \pm 0,19\%$  inférieure à la valeur trouvée dans cette étude  $91,73 \pm 0,26\%$  (Jin, van der Sman et al. 2014). Ce qui concerne le taux d'humidité de céleri, les résultats obtenus dans les travaux précédents étaient en accord avec les résultats obtenus dans cette étude. En outre, Helaly, El-Refy et al. (2014),

ont trouvé que la pomme de terre a un taux d'humidité de  $82,37 \pm 0,33\%$  proche aux résultats trouvés par Arafa, Sherif et al. (2021).

Un taux humidité élevée constitue un environnement favorable aux micro-organismes, les fruits et légumes deviennent sensibles à la détérioration microbienne, de sorte que le séchage a été utilisé pour réduire l'humidité et maintenir la qualité nutritionnelle (Changrue, Raghavan et al. 2006) et permet aussi de stocker les fruits et légumes à longue durée (Guiné and Barroca 2012).

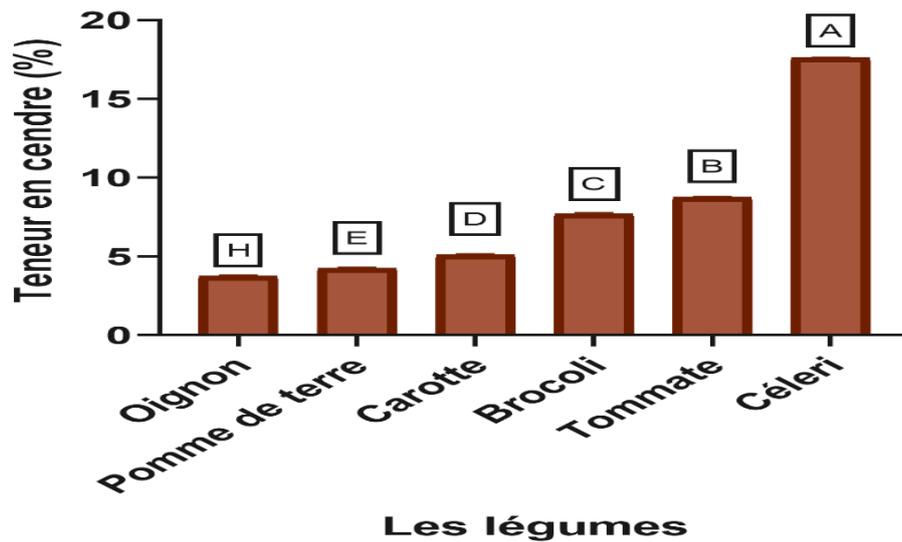
### III.2 Criblages phytochimiques des légumes séchés

La teneur en cendre, polysaccharides, polyphénols totaux et flavonoïdes des légumes séchées (brocoli, céleri, oignon, pomme de terre, carotte, tomate) ont été déterminés. La teneur en cendre, et la teneur en polysaccharides des légumes séchés sont exprimées en pourcentage (%). De plus, les concentrations des polyphénols totaux, des flavonoïdes sont déterminées à partir des courbes d'étalonnages tracées en utilisant comme standard l'acide gallique ( $y = 12,089X + 0,0034$ ,  $R^2 = 0,999$ ), la quercétine ( $y=38,425x + 0,0037$  avec  $R^2= 0,998$ ), respectivement. Les concentrations sont exprimées en mg EAG /g de poudre de légume séché pour les polyphénols totaux, en mg EQ /g de poudre de légume séché pour les flavonoïdes.

#### III.2.1 Teneur en cendre

La teneur en cendres d'un aliment est une indicatrice de sa teneur globale en sels minéraux (Facho, Njintang et al. 2009). Les cendres brutes sont obtenues via une calcination à haute température d'un matériau sec. Les sels minéraux constitués de tissus animaux ou plantes. Nous pouvons distinguer les macroéléments (Ca, Mg, P) et oligo-éléments (Fe, I, Se, etc), qui sont toxiques à fortes doses (Facho, Njintang et al. 2009). Les teneurs en cendres de six légumes (brocoli, carotte, oignon, pomme de terre, céleri, tomate) sont présentés dans la figure 10.

La variation de la teneur en cendre est significative d'un légume à l'autre. La teneur en cendre des légumes séchés varie entre 4% à 17%, les légumes notamment céleri, tomate, brocoli, carotte, pomme de terre, oignon ont montré des teneurs en cendre de  $17,61 \pm 0,02\%$  ;  $8,76 \pm 0,05\%$  ;  $7,7 \pm 0,08\%$  ;  $5,11 \pm 0,05\%$  ;  $4,26 \pm 0,05\%$  et  $3,77 \pm 0,05\%$  respectivement (figure 10). Toutefois, le céleri présente une teneur de cendre plus élevée ( $17,61 \pm 0,02\%$ ) et l'oignon montre une teneur en cendre plus faible ( $3,77 \pm 0,05\%$ ).



**Figure 10** | Teneur en cendre des légumes séchés.

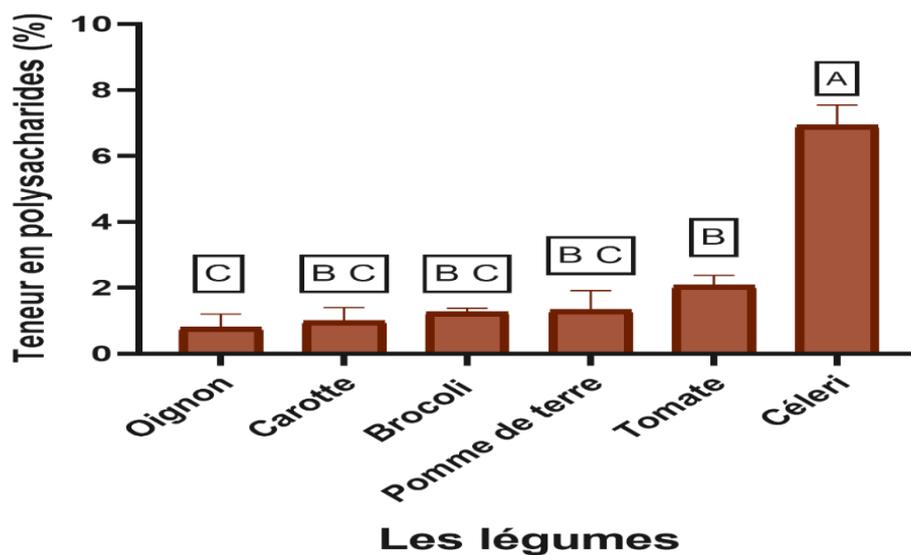
En comparant nos résultats avec ceux d'Ashoush, Ali et al. (2017), la teneur totale en cendres des feuilles de céleri était de 20,98%, nous avons donc remarqué qu'elle était plus riche que nos résultats. En outre, la teneur en cendre de brocoli montré dans les travaux antérieurs était de 7,67% de poids sec, une teneur proche de celle qu'on a enregistré ( $7,7 \pm 0,08\%$ ) (Ashoush, Ali et al. 2017). Surendar, Shere et al. (2018) ont indiqué qu'une teneur en minéraux dans la tomate est légèrement inférieure au résultat obtenu ( $8,76 \pm 0,05\%$ ). D'autre part Farooq, A. Rather et al. (2020), ont montré que la teneur en cendre des tomates lyophilisés et séchés à l'air chaud sans prétraitement est de 1,34% et 1,12%, respectivement, ce qui est inférieur par rapport au résultat obtenu. En ce qui concerne l'oignon, Konate, Parkouda et al. (2017) ont rapporté des teneurs en cendres de onze variétés d'oignon entre 2,5 à 6,64%, la plupart de variétés sont proche a la teneur en cendre obtenue dans notre étude ( $3,77 \pm 0,05\%$ ).

Les éléments minéraux sont impliqués dans un large éventail de fonctions dans le corps, y compris la minéralisation, le contrôle de l'équilibre hydrique, les systèmes enzymatiques et hormonaux, les systèmes musculo-squelettique, les systèmes nerveux et immunitaire, il n'y a pas de synthèse d'hémoglobine sans fer, pas de contraction musculaire sans calcium, potassium ou magnésium (Konate, Parkouda et al. 2017).

### III.2.2 Teneur en polysaccharides

Les polysaccharides sont des structures glucidiques polymères constituées d'unités répétitives liées entre elles par des liaisons glycosidiques. Les polysaccharides des légumes et de fruits ont été largement étudiés pour leurs propriétés chimiques et leurs activités biologiques (Ghazala, Sila et al. 2015).

D'après les résultats montrés dans la figure 11, la teneur la plus élevée en polysaccharides a été obtenue principalement dans le céleri avec une valeur de  $6,93 \pm 0,61\%$ , cependant les autres légumes séchés ; pomme de terre, carotte, oignon, brocoli et tomate avaient des teneurs en polysaccharides inférieures 2% de poudre sèche. Le résultat obtenu par Grzelak-Błaszczyk, Czarnecki et al. (2020) est similaires au résultat obtenu dans cette étude. D'autre part, des résultats obtenus par Jin, van der Sman et al. (2014) montrent que brocoli contient 3,2% en polysaccharides. Cette valeur est supérieure au résultat trouvé dans notre travail ( $1,26 \pm 0,11\%$ ).



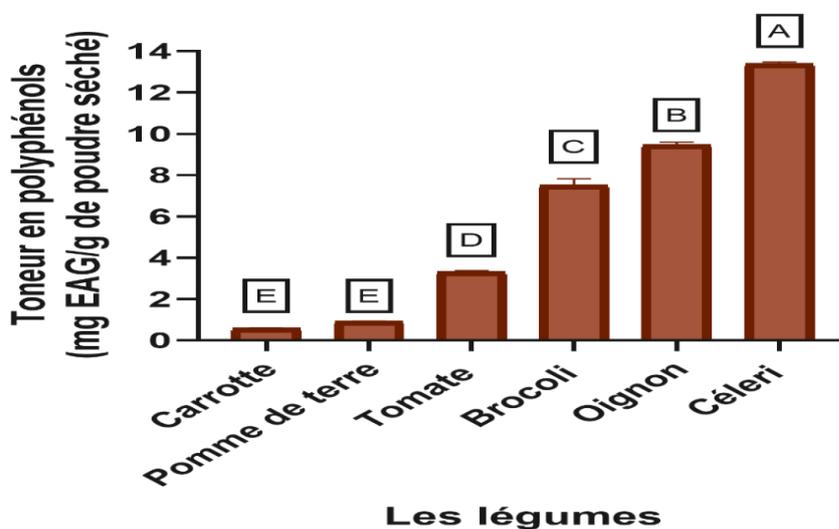
**Figure 11** | Rendements d'extraction des polysaccharides bruts des différentes légumes

Les polysaccharides montrent des fortes activités antigéniques et pathogènes et sont utilisés avec succès dans la formulation de vaccins par l'industrie pharmaceutique et profitant également de leurs propriétés physicochimiques comme des agents émulsifiants, viscoélasticité, adhérences, et additifs alimentaires industriels (Tommonaro, Poli et al. 2008). Les polysaccharides possèdent une valeur importante grâce à leurs bio-activité fonctionnelle y compris l'activité antioxydante, hypo-lipidique, hypoglycémique, anticancéreuse et anti-inflammatoire (Li, Li et al. 2019).

### III.2.3 Teneur en polyphénols

Les polyphénols sont des métabolites secondaires des végétaux largement distribués dans ses tissus (Martí, Valcárcel et al. 2015). Ces substances sont des antioxydants naturels, ayant le potentiel de protéger le corps contre certaines maladies (Cheng, Chen et al. 2013). Dans cette étude, les concentrations des composés phénoliques les plus élevés ont été obtenus dans le céleri

avec  $13,39 \pm 0,07$  mg EAG/g, l'oignon avec  $9,46 \pm 0,12$  mg EAG/g et le brocoli avec  $7,50 \pm 0,3$  mg de GAE/g (figure 12). Cependant, les autres légumes séchés notamment la tomate, la pomme de terre et la carotte avaient des concentrations inférieures à ceux du céleri, de l'oignon et du brocoli avec des valeurs de  $3,32 \pm 0,05$  mg EAG/g,  $0,93 \pm 0,01$  mg EAG/g, et  $0,58 \pm 0,01$  mg EAG/g de poudre séché respectivement (figure 12).



**Figure 12** | Teneur en polyphénols totaux des légumes séchés.

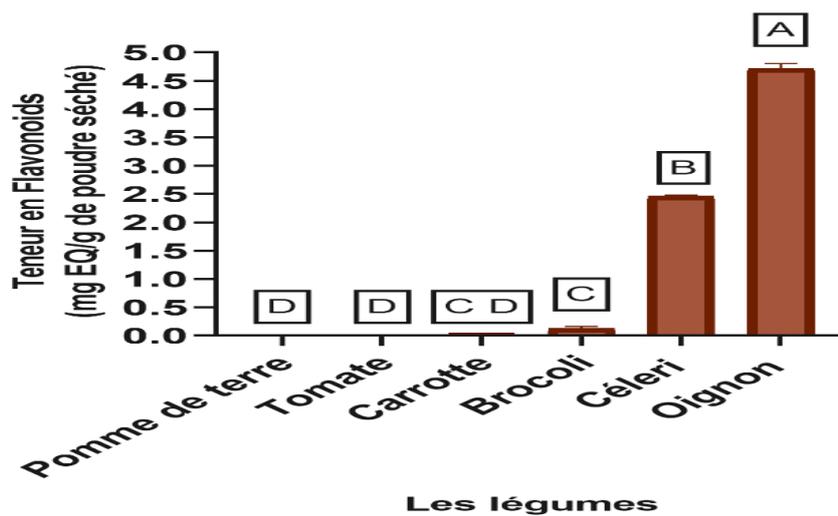
La teneur en composés phénoliques totaux du céleri obtenu dans cette étude est inférieure au résultat obtenu par Derouich, Bouhlali et al. (2020), qui ont trouvé de teneur de  $17,39 \pm 0,89$  mg EAG/g DW. Alors que Ordoñez-Araque and Narváez-Aldáz et al. (2019) ont trouvé une valeur inférieure à notre résultat de  $10,01 \pm 3,25$  mg EAG/g DW. D'autre part, Nos résultats sont en accord avec les travaux de Cheng, Chen et al. (2013) qui indique que l'oignon rouge a une teneur en polyphénols de  $5,71 \pm 0,20$  jusqu'à  $18,58 \pm 0,6$  mg EAG/g DW. La teneur en polyphénols de brocoli ( $8,05$  mg EGA/g DW) obtenu par Saavedra-Leos, Leyva-Porras et al. (2021) est légèrement supérieure à notre résultat ( $7,50 \pm 0,3$  mg de GAE/g). Les légumes qui ont une teneur élevée en composée phénolique telle que céleri, brocoli, oignon possède des propriétés bénéfiques sur la santé humaine sont considéré comme des antioxydants naturels, des anticancéreux, et comme des agents cicatrisants des plaies (Lima, Vianello et al. 2014).

### III.2.4 Teneur en flavonoïdes

Les flavonoïdes sont une sorte de polyphénols qui a deux anneaux aromatiques ou plus, dont chacun possède au moins un hydroxyle aromatique et est relié par un anneau avec un pont en carbone (Beecher 2003). De plus, Les flavonoïdes sont très abondants dans plusieurs fruits, les légumes, les fleurs et les graines (Dias, Pinto et al. 2021). Les teneurs en flavonoïde des six

légumes (brocoli, carotte, oignon, pomme de terre, céleri, tomate) sont présentées dans la figure 13.

A la première lecture des résultats, nous avons remarqué que les flavonoïdes sont concentrés principalement dans l'oignon, céleri, et brocoli par rapport à la tomate, carotte, et pomme de terre. Les résultats montrent que les concentrations maximales des flavonoïdes sont obtenues dans l'oignon ( $4,71 \pm 0,08$  mg EQ/g de poudre séché) et céleri ( $2,45 \pm 0,02$  mg EQ/g de poudre séché) (figure 13). Nous remarquons que ces résultats ne concordent pas avec les résultats d'extraction des polyphénols (figure 12 et 13). Sharma, Assefa et al. (2014), ont rapporté de teneurs de  $2,87 \pm 0,06$  mg EQ  $g^{-1}$  DW pour l'oignon qui est inférieur par rapport à la teneur en flavonoïdes obtenue dans notre étude ( $4,71 \pm 0,08$  mg EQ/g de poudre séché).



**Figure 13** | Teneur en flavonoïdes des différentes légumes séchés.

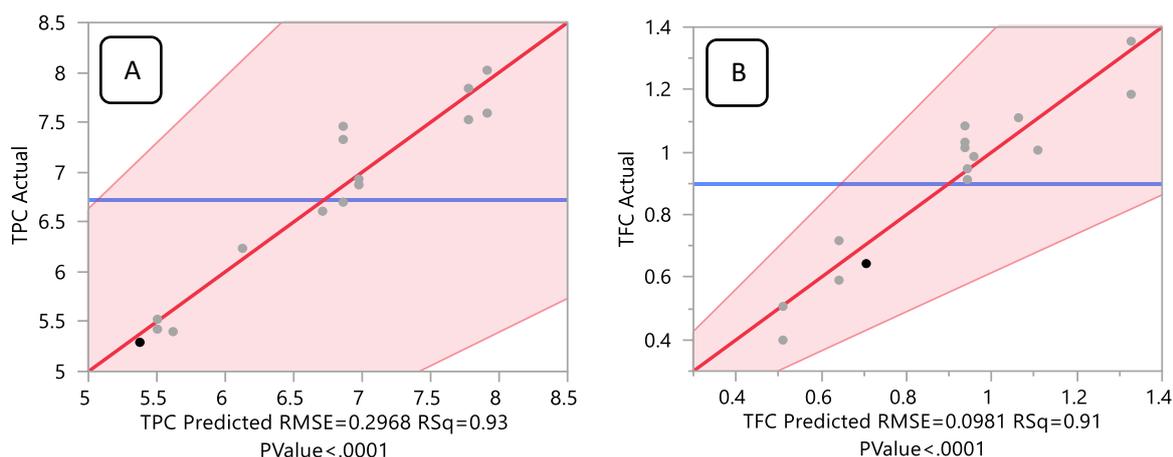
Les teneurs en flavonoïdes de feuilles *d'A.graveolens* (céleri) montré par Jung, Chung et al. (2011) est variés entre  $0,77 \pm 0,01$  et  $2,12 \pm 0,08$  mg EQ/g de poudre séché à propos de deux extraits aqueux et méthanolique respectivement, Ces valeurs sont inférieure à celles obtenues dans notre étude sur les flavonoïdes de céleri ( $2,45 \pm 0,02$  mg EQ/g de poudre séché). Ces résultats pourraient être expliqués par la différence dans le génotype de plante, les conditions de l'environnement de croissance, les caractéristiques du sol, la récolte et le stockage des légumes (Dias, Pinto et al. 2021).

Les flavonoïdes sont des inhibiteurs enzymatiques de l'aldose réductase, de la phospholipase A2 et des enzymes liées à l'inflammation telles que la cyclooxygénase et la lipooxygénase, de plus sa propriété la plus connue est leur capacité à piéger les radicaux libres (Ghedira 2005).

### III.3 Plan de mélange (D-optimal)

#### III.3.1 L'ajustement du modèle

Le plan de mélange (D-optimal) avec 15 essais expérimentaux a été utilisé pour cribler l'effet de chaque ingrédient (les légumes) sur les composés phénoliques totaux et les flavonoïdes, le tableau 3 illustre la variation des composés phénoliques et des flavonoïdes à travers la variation de la quantité de légumes en utilisant le plan mélange (D-optimal). La meilleure combinaison des légumes qui donne le maximum de composés phénoliques ( $8,02 \pm 0,07$  mg EAG/g) était l'essai 7 et la meilleure formulation à haute teneur en flavonoïdes ( $1,35 \pm 0,01$  mg EQ/g) a été remarquée au test 6.



**Figure 14** | Corrélation entre les réponses prédits et expérimentaux, **A** : corrélation entre la teneur en polyphénols expérimental et prédit, **B** : corrélation entre la teneur en flavonoïdes expérimental et prédit.

L'ajustement du plan de mélange (D-optimal) pour les composés phénoliques et flavonoïdes totaux a été évalué (tableau 4), à l'aide de l'analyse de la variance (ANOVA) et du manque d'ajustement, R au carré ( $R^2$ ), R- au carré ajusté ( $R_{ajusté}^2$ ); et le coefficient de variation (CV). Dans le plan mélange (D-optimal), un bon ajustement a été obtenu avec des valeurs  $R^2$  de 0,92, 0,90, pour la teneur totale en polyphénols et en flavonoïdes respectivement (figure 6), ces valeurs  $R^2$  élevées ont révélé que 92 % et 90 % de la variance expliquée par le modèle de régression avec un coefficient de variance (CV) inférieur à 2 % pour toutes les réponses (teneur en polyphénols et en flavonoïdes) (tableau 4 et figure 14). Plusieurs travaux montrent que le modèle de régression avec  $R^2$  élevé, plus la variance expliquée par le modèle de régression est important, plus les points de données se rapprocheront de la ligne de régression ajustée.

$$\begin{aligned} \text{Teneur en polyphénols (mg EAG/g)} = & 6.97 \times \left( \frac{(\text{Brocoli}-0.4)}{0.29} \right) + 6.20 \times \left( \frac{(\text{Oignon}-0.1)}{0.29} \right) + \\ & 11.39 \times \left( \frac{(\text{Céleri}-0.1)}{0.29} \right) + 5.50 \times \left( \frac{(\text{Mélange de légumes séchés}-0.1)}{0.29} \right) + 5.09 \times \left( \frac{(\text{sels}-0.01)}{0.29} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 \text{Teneur en Flavonoïdes (mg EQ/g)} = & 6.97 \times \left( \frac{(\text{Brocoli}-0.4)}{0.29} \right) + 6.20 \times \left( \frac{(\text{Oignon}-0.1)}{0.29} \right) + \\
 & 11.39 \times \left( \frac{(\text{Céleri}-0.1)}{0.29} \right) + 5.50 \times \left( \frac{(\text{Mélange de légumes séchés}-0.1)}{0.29} \right) + 5.09 \times \left( \frac{(\text{sels}-0.01)}{0.29} \right) \quad (12)
 \end{aligned}$$

**Tableau 5:** Les teneurs en polyphénols et flavonoïdes des différentes formulations de légumes exécuté par le plan de mélange (D-optimal).

Essais	Brocoli	Oignon	Céleri	Mélange de légumes	Salinité	Polyphénols (mg EAG/g)	Flavonoïdes (mg EQ/g)
1	0,4	0,1	0,1	0,3	0,1	5,29 ± 0,10	0,64 ± 0,001
2	0,4	0,1	0,1	0,39	0,01	5,42 ± 0,04	0,71 ± 0,01
3	0,4	0,1	0,1	0,39	0,01	5,52 ± 0,21	0,59 ± 0,01
4	0,4	0,2	0,1	0,2	0,1	5,39 ± 0,17	1,00 ± 0,02
5	0,4	0,2	0,2	0,19	0,01	7,52 ± 0,18	1,18 ± 0,01
6	0,4	0,2	0,2	0,19	0,01	7,84 ± 0,30	1,35 ± 0,02
7	0,5	0,1	0,2	0,1	0,1	8,02 ± 0,07	0,91 ± 0,03
8	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	6,23 ± 0,10	1,11 ± 0,02
9	0,5	0,1	0,2	0,1	0,1	7,59 ± 0,17	0,94 ± 0,01
10	0,59	0,2	0,1	0,1	0,01	6,60 ± 0,40	0,98 ± 0,02
11	0,69	0,1	0,1	0,1	0,01	6,87 ± 0,37	0,39 ± 0,02
12	0,69	0,1	0,1	0,1	0,01	6,93 ± 0,05	0,50 ± 0,004
13	0,480	0,144	0,144	0,180	0,0503	6,69 ± 0,01	1,08 ± 0,01
14	0,480	0,144	0,144	0,180	0,0503	7,32 ± 0,19	1,03 ± 0,009
15	0,480	0,144	0,144	0,180	0,0503	7,45 ± 0,001	1,01 ± 0,01

**mg EAG/g :** mg équivalent acide gallique par gramme, **mg EQ/g :** mg équivalent quercétine par gramme

De plus, un  $R_{ajusté}^2$  plus élevé indique que 90 %, 86 % de la variation s'expliquent uniquement par les ingrédients qui affectent la teneur en polyphénols et en flavonoïdes (tableau 4). De plus, l'ANOVA montre que le plan de mélange (D-optimal) est significatif avec une valeur de  $p < 0,0001$ , ainsi qu'avec un manque d'ajustement non significatif (valeur de  $p > 0,05$ ) pour chaque réponse (composés phénoliques totaux et flavonoïdes). De plus, tous les coefficients estimés positifs sont présentés dans le tableau 4 et l'équation 11 et 12, confirment

que tous les ingrédients (légumes secs) ont présenté des effets linéaires significatifs sur la teneur totale en polyphénols et flavonoïdes.

**Tableau 6:** Effets des légumes séchés sur la teneur en polyphénols et flavonoïdes.

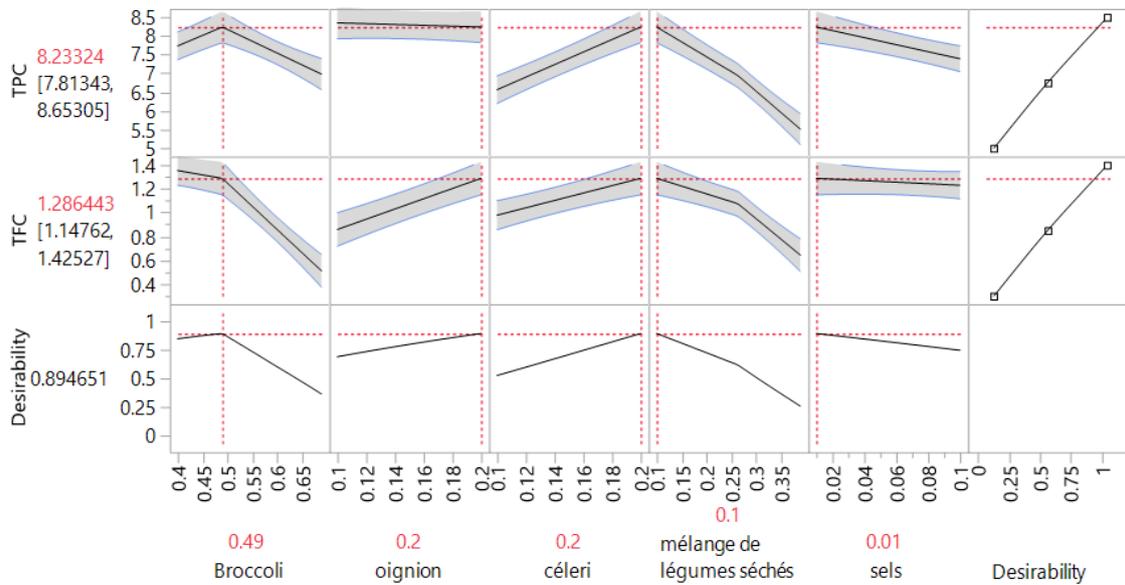
Paramètres	Teneur en polyphénols (mg EAG/g)		Teneur en flavonoïdes (mg EQ/g)	
	CE	$\rho$ -value	CE	$\rho$ -value
<b>Testé par rapport à un modèle réduit : Y=moyenne</b>				
(Brocoli-0.4)/0.29	6,97	< 0,0001 <sup>a</sup>	0,51	< 0,0001 <sup>a</sup>
(Oignon-0.1)/0.29	6,20	< 0,0001 <sup>a</sup>	1,80	< 0,0001 <sup>a</sup>
(Céleri-0.1)/0.29	11,39	< 0,0001 <sup>a</sup>	1,46	< 0,0001 <sup>a</sup>
(Mélange de légumes séchés-0.1)/0.29	5,50	< 0,0001 <sup>a</sup>	0,64	< 0,0001 <sup>a</sup>
(sels-0.01)/0.29	5,09	< 0,0001 <sup>a</sup>	0,84	0,0005 <sup>a</sup>
<b>R<sup>2</sup></b>	0,92		0,90	
<b>R<sup>2</sup><sub>Adj</sub></b>	0,90		0,86	
<b>RMSE</b>	0,296		0,098	
<b>Résultats de la régression</b>	<b>C.V (%)</b>	1,79	0,56	
	<b>ANOVA (Model)</b>	< 0,0001 <sup>a</sup>	< 0,0001 <sup>a</sup>	
	<b>Manque d'ajustement</b>	0,3972 <sup>b</sup>	0,214 <sup>b</sup>	

**CE;** coefficient estimation, **RMSE;** Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne , **C.V;** Coefficient de variance,  **$\rho$ -value <sup>a</sup>;** statistiquement significatif ,  **$\rho$ -value <sup>b</sup>;** statistiquement non significatif

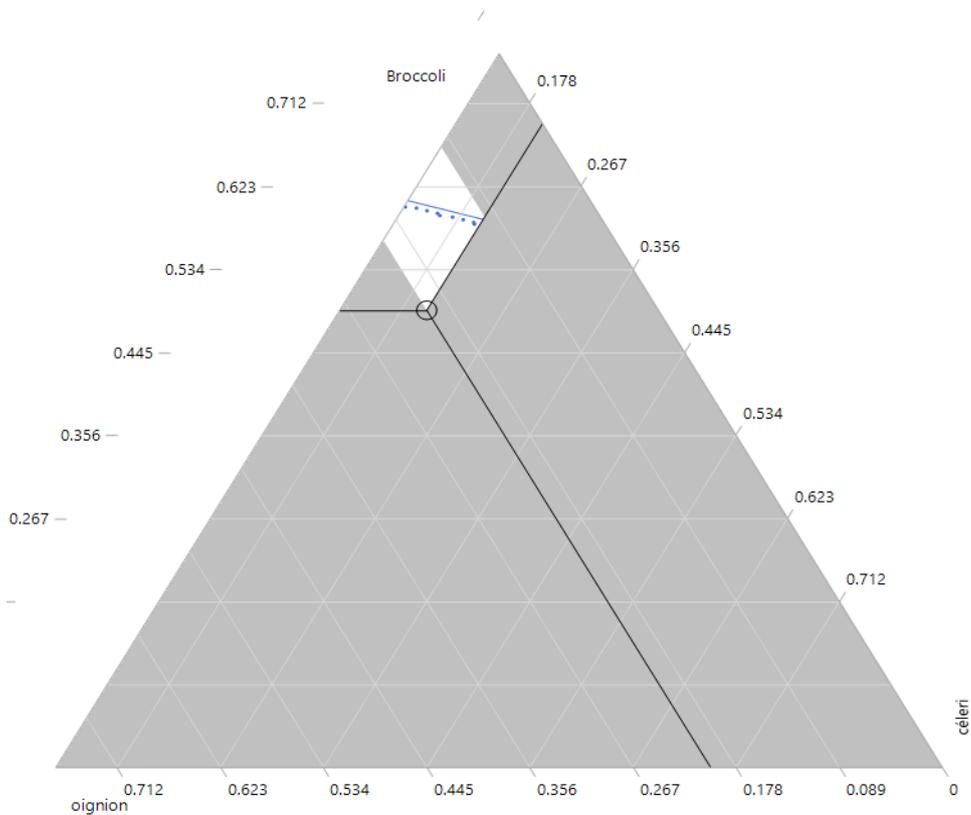
### III.3.2 Optimisation des proportions de mélange et validation du model

La formulation optimale a été obtenue en maximisant les composés phénoliques totaux et la teneur en flavonoïdes. En utilisant cette approche, un ensemble de combinaisons de brocoli, d'oignon, de céleri, d'un mélange de légumes et de sels a été trouvé. Dans cette étude, la formulation était de 49 % de brocoli, 20 % d'oignon, 20 % de céleri, 10 % d'un mélange de légumes et 1 % de sels, où le maximum de composés phénoliques totaux et de flavonoïdes était de 8,23 mg EAG/g, et 1,23 mg EQ/g respectivement comme montre dans les profilers de prédiction et de mélange (figures 15 et 16). De plus, les résultats expérimentaux obtenus basés sur la formulation optimale étaient proches aux valeurs prédites, où la teneur totale en

polyphénols et en flavonoïdes était de  $10,29 \pm 0,06$  mg EAG/g  $1,38 \pm 0,013$  mg EQ/g respectivement.



**Figure 15** | Profileur de prédiction des polyphénols et flavonoïdes simultanément en utilisant la fonction de désirabilité.



**Figure 16** | Profileur de mélange des ingrédients utilisé pour maximiser le rendement des polyphénols et flavonoïdes.

### III.4 Formulation de soupe déshydratée

La formulation de soupe déshydratée optimisée à l'aide du plan de mélange (D-optimal) a été obtenue, où les proportions d'ingrédients étaient de 49 % de brocoli, 20% de céleri, 20% d'oignon, 10% de mélange (carotte, pomme de terre, tomate 1/3 :1/3 :1/3) et 1% de sels. Le tableau 7 montre les valeurs nutritives et énergétiques de la soupe optimisée et de la soupe témoin. Les résultats indiquent que la soupe déshydratée optimisée montre à un taux d'humidité qui correspond à 10% avec une teneur en minéraux élevée ( $9 \pm 0,08\%$ ). Hanan, Rudra et al. (2020) ont signalé que moins de 10% de taux d'humidité de matière sèche est plus approprié pour conserver la qualité des ingrédients de la soupe.

Une étude comparative entre la soupe optimisée et la soupe témoin a été réalisée, les résultats indiquent que la teneur en protéine dans la soupe optimisée est de  $2,36 \pm 0,89$ , ce qui est inférieure à la soupe témoin ( $8 \pm 0,43\%$ ). La soupe optimisée est avérée avoir une teneur en polysaccharides ( $2,1 \pm 0,14\%$ ) inférieure à la soupe témoin ( $69,5 \pm 0,07\%$ ). En outre, la soupe optimisée contenait des valeurs plus élevées en lipide ( $9,4 \pm 0,08\%$ ) par rapport à la soupe témoin ( $3,5 \pm 0,11\%$ ).

**Tableau 7:** Composition chimique et nutritionnelle de la soupe optimisée et de la soupe témoin

	<b>Soupe optimisée</b>	<b>Soupe témoin</b>
	<b>(g/100 g de poudre)</b>	<b>(g/100 g de poudre)</b>
Taux d'humidité (%)	$10 \pm 0,62$	/
Teneur en cendre (%)	$9 \pm 0,08$	/
Protéine (%)	$3 \pm 0,89$	$8 \pm 0,43$
Polysaccharides (%)	$2,1 \pm 0,14$	$69,5 \pm 0,07$
Lipides (%)	$9,4 \pm 0,08$	$3,5 \pm 0,11$
Valeur énergétique (Kcal)	105	341

Des résultats différents ont été rapportés par Hanan, Rudra et al. (2020) qui ont développés un mélange de soupe instantanée aux pois à valeur ajoutée en utilisant de gousse de pois qui a entraîné une teneur élevée en carbohydrate ( $80,5 \pm 0,96\%$ ) de la soupe par rapport à la soupe optimisée et teneur faible en cendres ( $7,50 \pm 0,25\%$ ) et en matière grasse ( $1,90 \pm 0,15\%$ ) de la soupe par rapport à celle obtenue de notre étude.

### III.4.1 Réhydratation de soupe

La réhydratation est un processus complexe visant à restaurer les propriétés de la matière première lorsque la matière séchée est mise en contact avec de l'eau, les traitements de pré-séchage, le séchage ultérieur et la réhydratation en soi induisent de nombreux changements dans la structure et la composition des tissus végétaux (Lewicki 1998).

La réhydratation des tissus végétaux séchés est composée de trois processus simultanés : l'imbibition d'eau dans matériau, le gonflement et le lessivage des solubles (Krokida and Marinos-Kouris 2003). Une fois les aliments séchés reconstitués, il doit présenter des caractéristiques texturales, visuelles et sensorielles acceptables, tandis que le temps de réhydratation est minimisé (Abdel-Haleem and Omran 2014). Le ratio de réhydratation de soupe optimisée obtenu dans cette étude est de  $(7,582 \pm 0,40)$  (figure 17).

En se référant par l'étude de Abdel-Haleem and Omran (2014) qui ont développés quatre formules de soupes de mélange végétarien séchées F1, F2, F3 et F4 avec des ratios de réhydratation de  $2,96 \pm 0,04$  jusqu'à  $4,34 \pm 0,14$ , ce qui représente un ratio inférieur par rapport à la soupe optimisée. De plus les produits à fort pouvoir de réhydratation sont plus savoureux et conservent leur apparence fraîche, une valeur plus élevée du ratio de réhydratation (RR) indique que le produit séché est de bonne qualité car les pores permettent à l'eau de rentrer dans les cellules (Hanan, Rudra et al. 2020).



**Figure 17** | Aspect de la soupe déshydratée optimisée et de la soupe témoin après réhydratation.

### III.4.2 Etude comparative entre une soupe déshydratée optimisée et une soupe témoin

Le tableau 9 représente la teneur totale en composées phénolique, flavonoïdes et l'activité antioxydant déterminée dans la soupe optimisée et la soupe témoin. Les résultats rapportent la teneur en polyphénol de soupe optimisée de  $10,41 \pm 0,64$  mg EAG/g, qui est largement supérieur à celle de soupe témoin ( $4,74 \pm 0,13$  mg EAG/g). En ce qui concerne la teneur en

flavonoïde de soupe optimisée est de  $1,41 \pm 0,05$  mg EQ/g légèrement supérieur par rapport à la soupe témoin ( $1,17 \pm 0,01$  mg EQ/g).

Le test de piégeage des radicaux libres DPPH<sup>\*</sup> est le plus utilisé et efficace pour l'évaluation du potentiel antioxydant des extraits de plantes, ce radical libre est réduit en présence d'un antioxydant et forme une solution incolore (Kalsoom, Hamayun et al. 2021). Nos résultats montrent que la soupe optimisée a une bonne activité antioxydante avec pourcentage d'inhibition de  $79,31 \pm 0,76\%$ , cette activité est très élevée par rapport à la soupe témoin ( $4,78 \pm 0,25\%$ ). L'activité de piégeage des radicaux libre ABTS<sup>\*</sup> est largement utilisée pour l'activité antioxydante des extraits alimentaires contenant des composés hydrophiles, le test est basé sur la détermination de la décoloration de la solution d'ABTS (Kalsoom, Hamayun et al. 2021). Dans l'étude actuelle, la soupe optimisée montre une bonne activité antioxydante avec un pourcentage d'inhibition de  $75,77 \pm 1,68\%$  contre les radicaux libre ABTS<sup>\*</sup>. Cependant, la soupe témoin indique un pourcentage d'inhibition très faible ( $10,29 \pm 0,79$ ).

**Tableau 8:** Composés bioactifs et la capacité antioxydante de la soupe optimisée et la soupe témoin

	Soupe optimisée	Soupe témoin
<b>Teneur en polyphénols (mg EAG/g)</b>	$10,41 \pm 0,64$	$4,74 \pm 0,13$
<b>Teneur en Flavonoïdes (mg EQ/g)</b>	$1,41 \pm 0,05$	$1,17 \pm 0,01$
<b>Piégeage du radical libre DPPH (%)</b>	$79,31 \pm 0,76$	$4,78 \pm 0,25$
<b>Piégeage du radical libre ABTS (%)</b>	$75,77 \pm 1,68$	$10,29 \pm 0,79$

Nos résultats concernant l'activité antioxydante de la soupe déshydratée optimisée est légèrement inférieur avec ceux obtenus par Arafa, Sherif et al. (2021) qui a développé six formules de soupes aux légumes en poudre avec une teneur en flavonoïdes et une activité antioxydante de  $1,80 \pm 0,08$  jusqu'à  $6,62 \pm 0,43$  mg EQ/g,  $88,29 \pm 0,29\%$  jusqu'à  $96,72 \pm 0,73\%$  respectivement. Ce qui concerne la teneur en polyphénols de la soupe optimisée est largement supérieur à celle obtenue par ( $0,64 \pm 0,04$  jusqu'à  $1,19 \pm 0,07$  mg EAG/g) (Arafa, Sherif et al. 20

### IV. Conclusion

Afin de développer une soupe à haute teneur en composés phénoliques et flavonoïdes, un plan de mélange (D-optimal) a été appliqué dans cette étude. Dans un premier temps, six matières premières principales dont le brocoli, le céleri, l'oignon, la pomme de terre, la tomate, les carottes ont été sélectionnées pour la formulation de la soupe. Les rendements en cendres et en polysaccharides, la teneur en polyphénols et en flavonoïdes de chaque légume a été estimée. Les résultats indiquent qu'un maximum de cendres a été observé pour les feuilles de céleri ( $17,61 \pm 0,028\%$ ), suivi par la tomate ( $8,76 \pm 0,057\%$ ) et le brocoli ( $7,7 \pm 0,08\%$ ), dont les autres légumes présentaient une teneur en cendres inférieure à 5 %, ainsi que, le céleri a montré un rendement plus élevé en polysaccharides ( $6,93 \pm 0,61\%$ ) que les autres légumes (inférieur à 2%). Bien que le céleri ait un maximum de composés phénoliques totaux ( $13,39 \pm 0,07$  mg EAG/g), que l'oignon ( $9,46 \pm 0,12$  mg EAG/g) et le brocoli ( $7,50 \pm 0,12$  mg EAG/g), l'oignon a montré une valeur élevée de la teneur en flavonoïdes ( $4,71 \pm 0,08$  mg EQ/g) que le céleri ( $2,45 \pm 0,2$  mg EQ/g).

De plus, le plan du mélange (D-optimal) a été appliqué avec succès pour l'optimisation et le développement de soupe déshydratée avec des valeurs élevées de teneur en polyphénols et en flavonoïdes, la formulation obtenue était de 49% de brocoli, 20 % d'oignon, 20% de céleri, 10% de mélange de légumes (tomate-pomme de terre-carottes 1/3:1/3:1/3), et 1 % de sels. La formulation optimisée a montré une teneur totale en polyphénols et en flavonoïdes plus élevée avec  $10,29 \pm 0,06$  mg EAG/g  $1,38 \pm 0,013$  mg EQ/g respectivement.

La teneur totale en polyphénols, des flavonoïdes et l'activité antioxydante (radicaux libres DPPH• et ABTS•) de la soupe déshydratée optimisée à l'aide d'un plan de mélange (D-optimal) a été comparée à la soupe témoin. La teneur totale en polyphénols et en flavonoïdes de la soupe optimisée était élevée par rapport à la soupe témoin, ainsi que l'activité antioxydante de la soupe optimisée contre les radicaux libres DPPH• et ABTS• était de  $79,31 \pm 0,76$  % et  $75,77 \pm 1,68$  % respectivement, où elle est hautement élevée que la soupe témoin ( $4,78 \pm 0,25$  % et  $10,3 \pm 0,79$  %) pour DPPH• et ABTS• respectivement.

Par conséquent, la soupe déshydratée optimisée à l'aide du plan de mélange (D-optimal) pourrait être une excellente source des polyphénols et des flavonoïdes, ainsi que la soupe optimisée peut réduire le risque de maladies chroniques liées à l'âge, protégeant le corps contre les dommages et fournissant des mécanismes pour réduire les radicaux libres induits par le stress oxydatif en raison de leur activité antioxydante plus élevée.

En perspective, il serait indispensable de fournir des informations complémentaires sur les caractéristiques de la soupe déshydratée, avant de l'utiliser dans l'alimentation. De cet effet, on propose de :

- ✓ Appliquer un modèle d'optimisation (méthode des surfaces de réponses) pour but d'explorer les relations entre les ingrédients et la teneur en polyphénols et flavonoïdes dans la soupe optimale
- ✓ Effectuer des tests de rhéologie et propriété collante de la soupe déshydratée optimale
- ✓ Effectuer des analyses microbiologiques et sensorielles sur la soupe déshydratée optimale
- ✓ Caractérisation et identification des molécules bioactifs de la soupe déshydratée optimale en utilisant HPLC-MS.





# *Annexes*

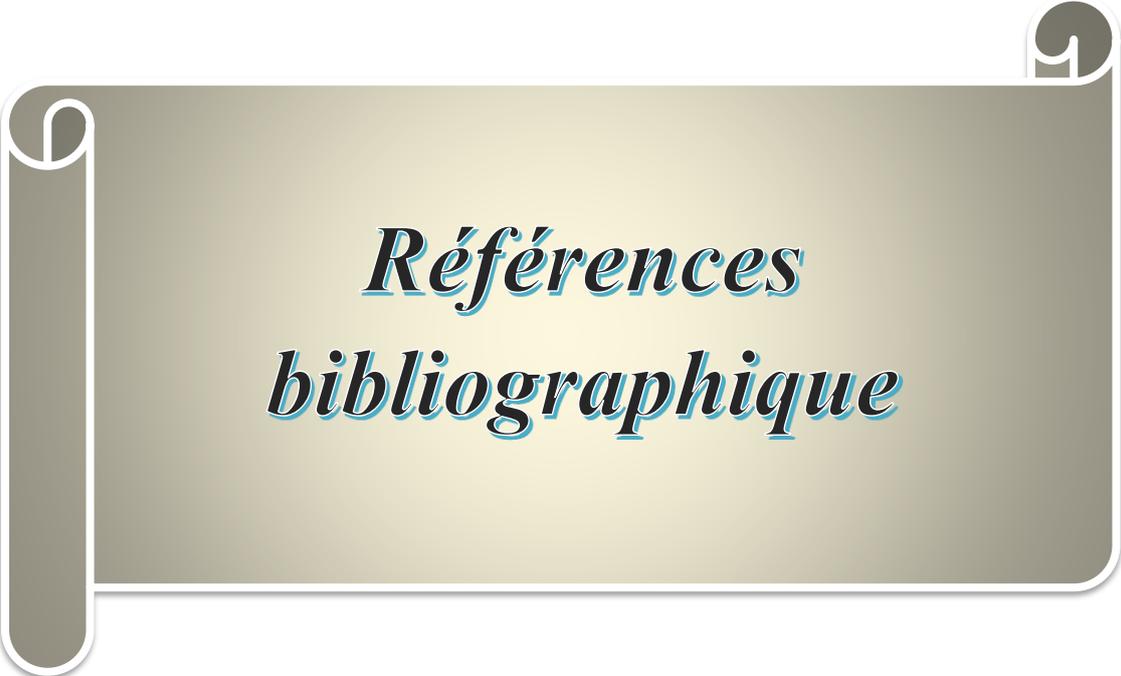
## Annexes

Tableau A.1 : Différents produits et appareillages utilisé dans l'évaluation des activités.

produits chimique	Appareils
Ethanol	Balance de précision (OHAUS, PX85, B937268868, USA).
Folin –Ciocalteu	Spectrophotomètre UV visible (UV/vis Spectrophotomètre, SP-3000nano, 5T5701-143132-00, Japan).
Carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )	Etuve ventilée (Mettler, D39263/D39264, B319.0656, Germany).
Chlorure d'aluminium ( $\text{AlCl}_3$ )	Tamis 200 $\mu\text{m}$ .
Acide chlorhydrique (HCl)	Bain marie (Mettler, L519.0937, Germany).
Hydroxyde de sodium (NaOH)	Plaque agitatrice (Stuart, R600002574, UK-PRC).
Hexane ( $\text{C}_6\text{H}_{14}$ )	Plaque chauffante (Stuart, R600002574, UK-PRC).
DPPH ( $\text{C}_{18}\text{H}_{12}\text{N}_5\text{O}_6$ )	Centrifugeuse (SIGMA, 3-16L, 172577, Germany).
ABTS (acide 2,2'-azino-bis (3éthylbenz-thiazoline-6-sulfonique))	Lyophilisateur (CHRIST, 22645, Germany).
persulfate de potassium ( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ )	Soxhlet
	Broyeur électrique
	Ultrasons à bain (J.P.SELECTA, s.a., 611898, Spain).
	pH mètre (Mettler-Toledo, B615331415).

**Tableau A.2** : ingrédients de la soupe déshydratée témoin (soupe commercialisée).

Ingrédients		Pourcentage
Les légumes (44%)	Pomme de terre	78%
	poireaux	14.7%
	chou	2.6%
	oignon	2%
	tomate	1.4%
	carotte	1.3 %
Autres	Farine de blé	/
	sel	/
	Amidon de blé	/
	Lactosérum	/
	Graisse végétales de palme	/
Additives alimentaire artificiels	céleri	/
	Amidon de maïs	/
	épices	/
	SIN (101) colorant	/
	SIN (407) épaississant	200 mg/kg
	SIN (621) exhausteur de gout	



*Références  
bibliographique*

*Références bibliographique*

A

- Abbou, A., et al. (2019).** "Effect of precipitation solvent on some biological activities of polysaccharides from *Pinus halepensis* Mill. seeds." Int J Biol Macromol **141**: 663-670.
- Abdel-Haleem, A. M. H. and A. A. Omran (2014).** "Preparation of Dried Vegetarian Soup Supplemented with Some Legumes." Food and Nutrition Sciences **05** (22): 2274-2285.
- Arafa, M. A., et al. (2021).** "Production of Vegetable Soup Powder with High Quality and Nutritive Value." Current Science International **10** (03): 425-433.
- Ashoush, Y., et al. (2017).** "Comparative study between celery leaves and broccoli flowers for their chemical composition and amino acids as well as phenolic and flavonoid compounds." Menoufia Journal of Agricultural Biotechnology **2**(1): 1-13.
- Azwanida, N. (2015).** "A review on the extraction methods use in medicinal plants, principle, strength and limitation." Med Aromat Plants **4** (196): 2167-0412.

B

- Babu, A., et al. (2018).** "Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models." Renewable and Sustainable Energy Reviews **90**: 536-556.
- Bazzano, L. A., et al. (2011).** "Non-soy legume consumption lowers cholesterol levels: a meta-analysis of randomized controlled trials." Nutrition, metabolism and cardiovascular diseases **21** (2): 94-103.
- Beecher, G. R. (2003).** "Overview of dietary flavonoids: nomenclature, occurrence and intake." The Journal of nutrition **133** (10): 3248S-3254S.
- Bouchenak, M. and M. Lamri-Senhadj (2013).** "Nutritional quality of legumes, and their role in cardiometabolic risk prevention: a review." Journal of medicinal food **16** (3): 185-198.
- Bukya, A., et al. (2018).** "Preparation and standardization of vegetable soup supplemented with apple fruit." World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences **7** (4): 869-875.

C

- Camire, M. E., et al. (2009).** "Potatoes and human health." Crit Rev Food Sci Nutr **49** (10): 823-840.
- Chakraborty, A. J., et al. (2022).** "*Allium cepa*: A Treasure of Bioactive Phytochemicals with Prospective Health Benefits." Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine **2022**: 1-27.
- Chang, Y. J., et al. (2017).** "Is vegetarian diet associated with a lower risk of breast cancer in Taiwanese women?" BMC Public Health **17** (1): 800.

**Changrue, V., et al. (2006).** "Microwave drying of fruits and vegetables." Stewart Postharvest Review **2** (6): 1-7.

**CHAUDHARI, S. and N. SOLANKE (2016).** "3. Formulation and sensory quality of legume based soup powder by sn chaudhari and np solanke." Life Sciences Leaflets **73**: 19 to 27-19 to 27.

**Chavan, R., et al. (2015).** "Whey based tomato soup powder: rheological and color properties." Int J Agric Sci Res **5**(4): 301-313.

**Chen, W.-J. L., et al. (1984).** "Propionate may mediate the hypocholesterolemic effects of certain soluble plant fibers in cholesterol-fed rats." Proceedings of the society for experimental biology and medicine **175** (2): 215-218.

**Cheng, A., et al. (2013).** "Comparison of phenolic content and antioxidant capacity of red and yellow onions." Czech Journal of Food Sciences **31** (5).

**Craig, D. Q., et al. (1999).** "The relevance of the amorphous state to pharmaceutical dosage forms: glassy drugs and freeze dried systems." International journal of pharmaceutics **179** (2): 179-207

### D

**Dagnelie, P. (2008).** "Le plan d'expérience évolue." Revue Modulad **38**: 13-36.

**Datta, S., et al. (2015).** Value addition of fruits and vegetables through drying and dehydration. Value Addition of Horticultural Crops: Recent Trends and Future Directions, Springer: 179-189.

**Derouich, M., et al. (2020).** "Assessment of total polyphenols, flavonoids and anti-inflammatory potential of three Apiaceae species grown in the Southeast of Morocco." Scientific African **9**: e00507.

**Dhiman, A. K., et al. (2017).** "Studies on development and storage stability of dehydrated pumpkin based instant soup mix." Journal of Applied and Natural Science **9** (3): 1815-1820.

**Dias, M. C., et al. (2021).** "Plant flavonoids: Chemical characteristics and biological activity." Molecules **26** (17): 5377.

### E

**Edith, K.-K. N., et al. (2020).** "Yao N'zué Benjamin."

**Ehlert, L. and J. Gabbert (1987).** Growing vegetable soup, Harcourt Orlando, FL.

**Elrih, W. M. and I. A. Ismael (2020)** "Development of a Quick Dried Soup Powder Mixes and Easy to Prepare."

### F

- Facho, B., et al. (2009).** "Collinlaw Joseph Ndouyang Ecole Nationale Supérieure des Sciences Agro-Industrielles (ENSAI), Université de Ngaoundéré, BP: 455 Ngaoundéré e-mail: ndouyang@ yahoo. fr Aba Richard Ejoh." Revue de génie industriel **3**: 18-26.
- Farooq, S., et al. (2020).** "Physicochemical and nutraceutical properties of tomato powder as affected by pretreatments, drying methods, and storage period." International Journal of Food Properties **23** (1): 797-808.
- Farzana, T., et al. (2017).** "Formulation and nutritional evaluation of a healthy vegetable soup powder supplemented with soy flour, mushroom, and moringa leaf." Food science & nutrition **5** (4): 911-920.
- Fernández-López, J., et al. (2020).** "Vegetable soups and creams: Raw materials, processing, health benefits, and innovation trends." Plants **9** (12): 1769.
- Fikselová, M., et al. (2008).** "Extraction of carrot (*Daucus carota* L.) carotenes under different conditions." Czech Journal of Food Sciences **26** (4): 268-274.

### G

- Galavi, A., et al. (2021).** "The effects of *Allium cepa* L. (onion) and its active constituents on metabolic syndrome: A review." Iran J Basic Med Sci **24** (1): 3-16.
- Galo, G. T., et al. (2021).** "Evaluation of purple onion (*Allium cepa* L.) extract as a natural corrosion inhibitor for carbon steel in acidic media." Metals and Materials International **27** (9): 3238-3249.
- Gao, Z., et al. (2020).** "Effect of alkaline extraction pH on structure properties, solubility, and beany flavor of yellow pea protein isolate." Food Research International **131**: 109045.
- Gardner, N. J., et al. (2001).** "Selection and characterization of mixed starter cultures for lactic acid fermentation of carrot, cabbage, beet and onion vegetable mixtures." International journal of food microbiology **64** (3): 261-275.
- Gerszberg, A., et al. (2014).** "Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in the service of biotechnology." Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC) **120** (3): 881-902.
- Ghazala, I., et al. (2015).** "Antioxidant and antimicrobial properties of water soluble polysaccharide extracted from carrot peels by-products." Journal of Food Science and Technology **52** (11): 6953-6965.
- Ghedira, K. (2005).** "Les flavonoïdes: structure, propriétés biologiques, rôle prophylactique et emplois en thérapeutique." Phytothérapie **3** (4): 162-169.
- Ghosh, P. and N. Venkatachalapathy (2014).** "Processing and drying of coffee—a review." Int. J. Eng. Res. Technol **3** (12): 784-794.
- Giugliano, D., et al. (2006).** "The effects of diet on inflammation: emphasis on the metabolic syndrome." Journal of the American College of Cardiology **48** (4): 677-685.

**Goupy, J. (2006).** Plans d'expériences, Ed. Techniques Ingénieur.

**Goupy, J. and L. Creighton (2013).** Introduction aux plans d'expériences: avec applications, Paris.

**Grant, W. (2004).** "Life at low water activity." Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences **359** (1448): 1249-1267.

**Grzelak-Błaszczak, K., et al. (2020).** "The effect of osmotic dehydration on the polyphenols content in onion." Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria **19** (1): 37-45.

**Guiné, R. P. and M. J. Barroca (2012).** "Effect of drying treatments on texture and color of vegetables (pumpkin and green pepper)." Food and bioproducts processing **90** (1): 58-63.

### H

**Hanan, E., et al. (2020).** "Utilization of pea pod powder for formulation of instant pea soup powder." Journal of Food Processing and Preservation **44** (11).

**Hedayati, N., et al. (2019).** "Beneficial effects of celery (*Apium graveolens*) on metabolic syndrome: A review of the existing evidences." Phytotherapy Research **33** (12): 3040-3053.

**Helaly, A. A.-D., et al. (2014).** "Morphological and molecular analysis of three celery accessions." Journal of medicinally active plants **2** (3): 27-32.

**Horwitz, W., Chichilo, P., & Reynolds, H. (1970).** Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists. Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists.

### I

**Ilahy, R., et al. (2020).** "Pre- and Post-harvest Factors Affecting Glucosinolate Content in Broccoli." Frontiers in Nutrition **7**.

### J

**Jiang, H., et al. (2013).** Fruit and vegetable powders. Handbook of food powders, Elsevier: 532-

**Jin, X., et al. (2014).** "Moisture sorption isotherms of broccoli interpreted with the Flory-Huggins free volume theory." Food Biophysics **9** (1): 1-9.

**Jung, W., et al. (2011).** "In vitro antioxidant activity, total phenolics and flavonoids from celery (*Apium graveolens*) leaves." Journal of Medicinal Plants Research **5** (32): 7022-70

### K

**Kalsoom, K., et al. (2021).** "Physicochemical Properties and Antioxidant Potential of Tateishi Kazu Vegetable Soup." Journal of Food Quality **2021**.

- Kamali Rousta, L., et al. (2020).** "Optimization of athletic pasta formulation by D-optimal mixture design." Food Science & Nutrition **8** (8): 4546-4554.
- Khairullah, A. R., et al. (2021).** "Review on the pharmacological and health aspects of *apium graveolens* or celery: An update." Systematic Reviews in Pharmacy **12** (2): 595-601.
- Kimura, S. and N. Sinha (2008).** "Tomato (*Solanum lycopersicum*): A Model Fruit-Bearing Crop." Cold Spring Harbor Protocols **2008** (11): pdb.emo105.
- Kiranoudis, C., et al. (1993).** "Equilibrium moisture content and heat of desorption of some vegetables." Journal of Food engineering **20** (1): 55-74.
- Konate, M., et al. (2017).** "Evaluation des potentialités nutritives et l'aptitude à la conservation de onze variétés d'oignon (*Allium cepa* L.) bulbe introduites au Burkina Faso." International Journal of Biological and Chemical Sciences **11** (5): 2005-2015.
- Kooti, W. and N. Daraei (2017).** "A Review of the Antioxidant Activity of Celery (*Apium graveolens* L)." J Evid Based Complementary Altern Med **22** (4): 1029-1034.
- Kowalski, S. M., et al. (2002).** "Split-plot designs and estimation methods for mixture experiments with process variables." Technometrics **44** (1): 72-79.
- Krokida, M. K. and D. Marinos-Kouris (2003).** "Rehydration kinetics of dehydrated products." Journal of food engineering **57** (1): 1-7.
- Kumar, P. and D. K. Srivastava (2016).** "Biotechnological applications in in vitro plant regeneration studies of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica*), an important vegetable crop." Biotechnology letters **38** (4): 561-571.
- Kumar, U. and G. Chandra (2018).** "A brief review of potash management in potato (*Solanum tuberosum* L.)." J. Pharmac. Phytochem **7**: 1718-1721.
- Kuroda, M. and K. Ninomiya (2020).** "Association between soup consumption and obesity: A systematic review with meta-analysis." Physiol Behav **225**: 113103.

### L

- Le, T. N., et al. (2020).** "Bioactive Compounds and Bioactivities of *Brassica oleracea* L. var. *Italica* Sprouts and Microgreens: An Updated Overview from a Nutraceutical Perspective." Plants (Basel) **9** (8).
- Lewicki, P. P. (1998).** "Some remarks on rehydration of dried foods." Journal of food engineering **36** (1): 81-87.
- Li, H., et al. (2022).** "Nutritional values, beneficial effects, and food applications of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck)." Trends in Food Science & Technology **119**: 288-308.
- Li, M., et al. (2014).** "Fruit and vegetable intake and risk of type 2 diabetes mellitus: meta-analysis of prospective cohort studies." BMJ open **4** (11): e005497.

**Li, Q., et al. (2019).** "Physicochemical properties and functional bioactivities of different bonding state polysaccharides extracted from tomato fruit." Carbohydrate polymers **219**: 181-190.

**Lima, G. P. P., et al. (2014).** "Polyphenols in fruits and vegetables and its effect on human health." Food and Nutrition sciences: 1065-1082.

**Liu, R. H. (2013).** "Health-promoting components of fruits and vegetables in the diet." Adv Nutr **4** (3): 384S-392S.

### M

**Maisnam, D., et al. (2017).** "Recent advances in conventional drying of foods." Journal of Food Technology and Preservation **1** (1).

**Mallillin, A. C., et al. (2008).** "Dietary fibre and fermentability characteristics of root crops and legumes." British Journal of Nutrition **100** (3): 485-488.

**Martí, R., et al. (2015).** "Fast simultaneous determination of prominent polyphenols in vegetables and fruits by reversed phase liquid chromatography using a fused-core column." Food chemistry **169**: 169-179.

**Mazandarani, Z., et al. (2014).** "Drying of agriculture products using hot air oven and microwave method." Indian Journal of Research in Pharmacy and Biotechnology **2** (6): 1522.

**McGill, C. R., et al. (2013).** "The role of potatoes and potato components in cardiometabolic health: a review." Ann Med **45**(7): 467-473.

**Mehdizadeh Allaf, M. and C. G. Trick (2019).** "Multiple-stressor design-of-experiment (DOE) and one-factor-at-a-time (OFAT) observations defining *Heterosigma akashiwo* growth and cell permeability." Journal of Applied Phycology **31** (6): 3515-3526.

**Mohamad Zen, N. I., et al. (2015).** "The use of D-optimal mixture design in optimizing development of okara tablet formulation as a dietary supplement." The Scientific World Journal **2015**.

**Moussa, H., et al. (2022).** "Optimization of ultrasound-assisted extraction of phenolic-saponin content from *Carthamus caeruleus* L. rhizome and predictive model based on support vector regression optimized by dragonfly algorithm." Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems: 104493.

**Mudgil, D. and S. Barak (2013).** "Composition, properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fiber: A review." International journal of biological macromolecules **61**: 1-6.

### O

**Ordoñez-Araque, R. and C. Narváez-Aldáz (2019).** "Changes in the physical-chemical composition, total polyphenols and antioxidant activity of fresh celery (*Apium graveolens* L.) dehydrated by hot air and by lyophilization." Agriscientia **36** (2): 57-65.

### P

**Pirasteh, G., et al. (2014).** "A review on development of solar drying applications." Renewable and Sustainable Energy Reviews **31**: 133-148.

**Prakash, O. and A. Kumar (2014).** "Solar greenhouse drying: A review." Renewable and Sustainable Energy Reviews **29**: 905-910.

### Q

**Que, F., et al. (2019).** "Advances in research on the carrot, an important root vegetable in the Apiaceae family." Hortic Res **6**: 69.

### R

**Rolls, B. J., et al. (1990).** "Foods with different satiating effects in humans." Appetite **15** (2): 115.

### S

**Saavedra-Leos, M. Z., et al. (2021).** "Physicochemical Properties and Antioxidant Activity of Spray-Dry Broccoli (*Brassica oleracea var Italica*) Stalk and Floret Juice Powders." Molecules **26** (7): 1973.

**Sablani, S. S. (2006).** "Drying of fruits and vegetables: retention of nutritional/functional quality." Drying technology **24** (2): 123-135.

**Sagar, V. and P. Suresh Kumar (2010).** "Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review." Journal of food science and technology **47** (1): 15-26.

**Şahin, İ., et al. (2017).** "Kinetics of supercritical drying of gels." Gels **4** (1): 3.

**Sahu, C. and S. Patel (2021).** "Optimization of maize–millet based soy fortified composite flour for preparation of RTE extruded products using D-optimal mixture design." Journal of Food Science and Technology **58** (7): 2651-2660.

**Samson, S., et al. (2016).** "Design and development of a nanoemulsion system containing copper peptide by D-optimal mixture design and evaluation of its physicochemical properties." RSC advances **6** (22): 17845-17856.

**Sharma, K., et al. (2014).** "Evaluation of total phenolics, flavonoids and antioxidant activity of 18 Korean onion cultivars: a comparative study." Journal of the Science of Food and Agriculture **94** (8): 1521-1529.

**Spanemberg, F. E., et al. (2019).** "Effects of sugar composition on shelf life of hard candy: Optimization study using D-optimal mixture design of experiments." Journal of Food Process Engineering **42**(6): e13213.

**Spooner, D. M. (2019).** "Daucus: Taxonomy, Phylogeny, Distribution." 9-26.

**Sugumar, J. K. and P. Guha (2020).** "Study on the formulation and optimization of functional soup mix of *Solanum nigrum* leaves." International Journal of Gastronomy and Food Science **20**: 100208.

**Sulaiman, I. S. C., et al. (2016).** "Design and development of a nanoemulsion system containing extract of *Clinacanthus nutans* (L.) leaves for transdermal delivery system by D-optimal mixture design and evaluation of its physicochemical properties." RSC advances **6** (71): 67378-67388.

**Surendar, J., et al. (2018).** "Effect of drying on quality characteristics of dried tomato powder." Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry **7** (2): 2690-2694.

### T

**Thuy, N. M., et al. (2019).** "Development and nutritional analysis of healthy chicken soup supplemented with vegetables in Viet Nam." Food Research **4** (1): 113-120.

**Tommonaro, G., et al. (2008).** "Tomato derived polysaccharides for biotechnological applications: chemical and biological approaches." Molecules **13** (6): 1384-1398.

**Trinidad, T. P., et al. (2010).** "The potential health benefits of legumes as a good source of dietary fibre." British journal of nutrition **103** (4): 569-574.

### U

**Upadhyay, S., et al. (2017).** "Production and evaluation of instant herbal mix soup." International Journal of Agricultural Science and Research **7** (3): 37-42.

### V

**van Buren, L., et al. (2019).** "Nutritional quality of dry vegetable soups." Nutrients **11** (6): 1270.

**Venkateswara Rao, P., et al. (2017).** "Flavonoid: A review on Naringenin." J. Pharmacogn. Phytochem **6**: 2778-2783.

### W

**Wakjira, M. (2010).** "Solar drying of fruits and windows of opportunities in Ethiopia." African journal of food science **4** (13): 790-802.

**Wuyts, D. (2011).** "Tomate *Solanum lycopersicum* esculentum, fructus." Phytothérapie **9** (4): 219.

### X

**Xie, H., et al. (2018).** "Monitoring metabolite production of aflatoxin biosynthesis by Orbitrap Fusion mass spectrometry and a D-optimal mixture design method." Analytical chemistry **90** (24): 14331-14338.

### Y

- Yahya, N. A., et al. (2022).** "Optimization of oil-in-water nanoemulsion system of Ananas comosus peels extract by D-optimal mixture design and its physicochemical properties." Journal of Dispersion Science and Technology **43** (2): 302-315.
- Yeom, D. W., et al. (2015).** "Development and optimization of a self-microemulsifying drug delivery system for atorvastatin calcium by using D-optimal mixture design." International journal of nanomedicine **10**: 3865.
- Yu, J., et al. (2019).** "A D-optimal mixture design of tomato-based sauce formulations: Effects of onion and EVOO on lycopene isomerization and bioaccessibility." Food & function **10** (6): 3589-3602.

### Z

- Zhan, J., et al. (2017).** "Fruit and vegetable consumption and risk of cardiovascular disease: A meta-analysis of prospective cohort studies." Critical reviews in food science and nutrition **57** (8): 1650-1663.
- Zhang, J. and G. W. Scherer (2011).** "Comparison of methods for arresting hydration of cement." Cement and Concrete Research **41** (10): 1024-1036.
- Zhang, M., et al. (2017).** "Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products." Critical reviews in food science and nutrition **57** (6): 1239-1255.
- Zhang, M., et al. (2010).** "Recent developments in microwave-assisted drying of vegetables, fruits, and aquatic products—Drying kinetics and quality considerations." Drying Technology **28** (11): 1307-1316.

## Résumé

Les soupes de légumes déshydratées en tant que source importante de nutriments ont gagné en popularité auprès des consommateurs. Dans cette étude, l'optimisation d'une poudre de soupe déshydratée avec des rendements élevés en polyphénols et en flavonoïdes à l'aide d'un plan de mélange (D-optimal) a été réalisée. De plus, la teneur en composés phénoliques totaux, les flavonoïdes et l'activité antioxydante contre les radicaux libres DPPH• et ABTS• de la soupe optimisée ont été comparés à une autre soupe comme témoin. Selon les résultats obtenus, le plan D-optimal a été utilisé avec succès pour prédire la formulation optimale pour un maximum de teneur en polyphénols (10,41 mg GAE/g) et en flavonoïdes (1,41 mg QE/g), où la formulation était de 49% de brocoli, 20% d'oignon, 20% de céleri, 10% de mélange de légumes, et 1% de sel. De plus, la soupe déshydratée optimisée présentait une teneur en composés bioactifs élevée que la soupe témoin, de sorte que la soupe optimisée présentait une activité de piégeage plus élevée que la soupe témoin. La soupe optimisée obtenue en utilisant le plan de mélange (D-optimal) pourrait être une excellente source pour aider à maintenir la santé et le bien-être du corps.

**Mots-clés :** Soupe déshydratée, Plan de mélange (D-optimal), composés phénoliques, flavonoïdes, activité antioxydante.

## Abstract

Dehydrated vegetable soups as a healthy source of nutrients have gained popularity among consumers. In this study, the optimization and development of soup powder with high yields of phenolic and flavonoids content using D-optimal mixture design (DMD) was carried out. Furthermore, the total phenolic compounds, flavonoids and antioxidant activity against DPPH• and ABTS• free radicals of optimized soup were compared to another soup as control. According to the results obtained, DMD was successfully used to predict the optimal formulation for maximum of phenolic (10.41 mg GAE/g) and flavonoids content (1.41 mg QE/g), where the formulation was 49% of broccoli, 20% of onion, 20% of celery, 10% mixture of vegetables, and 1% of salt. In addition, the optimized soup showed higher content in bioactive compounds than control soup, so the optimized soup exhibited higher scavenging activity than control soup. The optimized soup obtained using DMD could be an excellent source to help maintain the body's health and wellbeing.

**Keywords:** Dehydrated soup, DMD, phenolic compounds, flavonoids, antioxidant activity.

## ملخص

اكتسب حساء الخضار المجفف كمصدر مهم للعناصر الغذائية شعبية لدى المستهلكين. في هذه الدراسة، تم تحسين وتطوير مسحوق حساء الخضار مجفف يحتوي على نسبة عالية من البوليفينول والفلافونويد باستخدام plan de mélange (D-optimal). بالإضافة إلى ذلك، تمت مقارنة إجمالي المحتوى البوليفينول والفلافونويد والنشاط المضاد للأكسدة ضد الجذور الحرة (ABTS•, DPPH•) في الحساء المحسن بحساء آخر (شاهد). وفقاً للنتائج التي تم الحصول عليها، تم استخدام plan de mélange (D-optimal) بنجاح للتنبؤ بالتركيب المثلى لمحتوى أعلى من البوليفينول (1.41 mg EQ/g) والفلافونويد (1.41 mg EQ/g)، حيث كانت التركيبة 49% بروكلي، 20% بصل، 20% كرفس، 10% خليط نباتي، و1% ملح. بالإضافة إلى ذلك، كان الحساء المجفف المحسن يحتوي على مستويات أعلى من المركبات الفينولية والفلافونويد مقارنة بحساء آخر كشاهد، بحيث كان للحساء المحسن نشاط مضاد للأكسدة أعلى مقارنة بحساء آخر كشاهد. يمكن أن يكون الحساء المحسن الذي تم الحصول عليه باستخدام plan de mélange (D-optimal) مصدراً ممتازاً للمساعدة في الحفاظ على صحة الجسم ورفاهيته.

**الكلمات المفتاحية:** حساء الخضار المجفف، plan de mélange (D-optimal)، مركبات الفينولية، الفلافونويد، نشاط مضاد للأكسدة.