

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université KASDI MERBAH – Ouargla
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département Des Sciences Biologiques



Mémoire de Master Académique
Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie
Filière : Sciences Biologiques
Spécialité : Qualité des Produits et Sécurité Alimentaire

Thème

**Intérêt du Quinoa dans l'industrie
Alimentaire et Pharmaceutique**

Présenté par :

CHENINE Roukaya

SAHLI Zoulikha

Soutenu Publiquement Le : 04/10/2020

Devant le jury :

M^{elle}. HAMMOUDI R.	President	M.C.A	UKM Ouargla
Mr. MOSBAH S.	Examineur	M.C.B	UKM Ouargla
Mme. DJERROUDI O.	Promotrice	M.C.A	UKM Ouargla
Mme. BOUDJENAH S.	Co- Promotrice	Professeur	UKM Ouargla

Année Universitaire : 2019 / 2020

Remerciements

Au cours de la réalisation de ce travail, il nous a aimablement permis d'apprécier la collaboration de certaines personnes.

À ce qu'il nous soit permis d'exprimer notre gratitude, et d'adresser nos remerciements les plus chaleureux à :

Dieu le tout puissant, pour nous avoir donné le courage d'aller de l'avant et de réaliser ce travail ;

Mme DJROUDI. O pour ses précieux conseils ainsi pour son aide et ses orientations qui nous ont permis de réaliser ce travail ;

Mme BOUDJNAH. S, chef du département des Sciences Biologiques, pour son soutien, ses encouragements et sa collaboration pertinente pour réussir notre travail ;

M^{lle} HAMMOUDI, présidente du jury qui nous a fait l'honneur de juger ce travail ;

Mr MOSBAH, d'avoir accepté à examiner ce travail ;

Ainsi que tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

SAHLI. Z & CHENINE. R

table de matieres

Titre *Page*

Liste des Tableaux

Liste des Figures

Liste des Abréviations

Introduction 01

Chapitre I : Exploration Botanique

I. Origine et histoire du quinoa	02
II. Etude botanique	03
1. Classification	03
1.1 Classification scientifique	03
1.2 Classification morphologique	04
1.3 Ecotypes	04
2. Ecotype	04
3. Morphologie	05
2.3 Caractères végétatifs	05
2.4 Caractères floraux	06
2.5 Cultivation	09
2.6 Utilisation	10

Chapitre II : TECHNIQUES ET PROCEDES D'EXTRACTIONS

I. Extraction des saponines	24
1. Généralités	24
2. Procédé d'extraction	24
2.1 Mise en évidence des saponines	24
2.2 Extraction des saponines	25
2.3 Dosage des saponines totaux	26
II. Les huiles essentielles	27
1. Définition	27
2. Procédés d'extraction des huiles essentielles	27
2.1 Hydrodistillation	28
2.2 Entraînement à la vapeur d'eau	28
2.3 Extraction par solvants volatils	29

2.4	Hydro-diffusion	29
2.5	Extraction par fluide supercritique.....	30
3.	Conservation des huiles essentielles	31
4.	Caractérisations des huiles essentielles	31
III.	Extraction d'huile végétale	31
1.	Par presse hydraulique	31
2.	Par presse mécanique	31
3.	Par centrifugation	31
4.	Par extraction au solvant	32
IV.	Extraction des composés peptidiques et osidiques	33

Chapitre III : COMPOSITION CHIMIQUE ET VALEURS NUTRITIONNELLES

I.	Composition chimique des graines de quinoa.....	11
1.	Protéines.....	11
1.1	Les protéines de stockage	11
1.2	Inhibiteurs de protéase	13
1.3	Lectines	13
2.	Glucides	14
2.1	L'amidon	14
2.2	Les fibres alimentaires	15
2.3	Sucres simples.....	15
3.	Lipides et composés lipidiques.....	15
4.	Minéraux.....	17
5.	Vitamines.....	18
6.	Terpènes et Stéroïdes.....	19
6.1	Squalène et phytostérols.....	19
6.2	Les Saponines.....	20
6.3	Composés Phénoliques.....	21
6.4	Acides phénoliques.....	21
6.5	Flavonoïdes.....	21
6.6	Tanins.....	22
7.	Pigment.....	22
7.1	Caroténoïdes.....	22
7.2	Bétacyanines.....	22
II.	Valeurs nutritionnelles des graines du quinoa.....	22

Chapitre IV : PROPRIÉTÉS PHARMACOLOGIQUES ET MÉDICINALES

I.	Propriétés pharmacologiques.....	36
1.	Activité anti-inflammatoire.....	36
2.	Activité anti-oxydante.....	37
3.	Activité anti-ulcéreuse.....	38
4.	Activité antifongique	38

II. Nutrition	39
1. Gluten-free.....	39
2. Effet bénéfique sur le système cardiovasculaire.....	40
3. Effet antidiabétique et anti-obésité.....	40
4. Fibres alimentaires.....	41
III. Anti nutrition	42
1. Généralités sur les facteurs antinutritionnels.....	42
2. Effet néfaste sur la croissance.....	42
3. Effet néfaste sur l'oxalurie.....	42
4. Elimination des facteurs antinutritionnels ou annulation de leurs effets.....	43
IV. Toxicité	44
1. Potentiel allergisant.....	44
2. Activité lytique.....	44
2.1 Activité hémolytique.....	44
2.2 Activité sur la perméabilité intestinale.....	45
 Conclusion	 46
 Liste des Références	

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 01 : Classification scientifique du quinoa	03
Tableau 02 : Colorations dans le fruit du quinoa.....	08
Tableau 03 : Comparaison de la composition en acides aminés et de la teneur en protéines de la graine de quinoa avec d'autres céréales et légumineuses (mg/100g)	13
Tableau 04 : Composition lipidique dans la graine de quinoa (en %).....	16
Tableau 05 : Comparaison de la composition en acides gras de la fraction lipidique des graines de quinoa, du blé et du maïs (g/100g).....	17
Tableau 06 : Comparaison de la teneur moyenne en minéraux du quinoa avec d'autres céréales (mg/100g).....	18
Tableau 07 : Comparaison de la teneur en vitamines de la graine de quinoa avec d'autres céréales (µg/g).....	19
Tableau 08 : Teneur en squalène et phytostérols dans les graines de quinoa et comparaison avec d'autres céréales et légumineuses (mg/100g).....	20
Tableau 09 : Teneurs en macronutriments du quinoa et d'autre aliments (pour 100 grammes de poids sec) (Koziol., 1992).....	23
Tableau 10 : Valeurs énergétique et nutritionnelles pour 100 g de quinoa	23

LISTES DES FIGURES

Figure 01	: Distribution géographique du quinoa (FAO, 2011).....	05
Figure 02	: Système racinaire du quinoa (Gandarillas, 1979)	05
Figure 03	: Panicules de quinoa	07
Figure 04	: Les formes d'inflorescences du quinoa (Tapia et Fries, 2007).....	07
Figure 05	: Inflorescence amaranthiforme et glomérulaire (IRD).....	07
Figure 06	: Fleurs hermaphrodites et femelles du quinoa (Gandarillas, 1979).....	08
Figure 07	: <i>Chenopodium quinoa</i> —structure interne de la graine (Section médiane longitudinale) (Pregoet <i>al.</i> , 1998).....	09
Figure 08	: structure des saponines (Bruneton, 1999).....	19
Figure 09	: Protocole d'extraction des saponines (Goel <i>etal.</i> , 2012).....	24
Figure 10	: Courbe d'étalonnage (dosage des saponines totales).....	25
Figure 11	: Schéma du principe de la technique d'hydro distillation (Lucchesi M. E. 2005)	26
Figure 12	: Montage de l'entraînement à la vapeur d'eau (http://www.pranarom.com)	30
Figure 13	: Schéma de l'appareillage d'extraction au soxhlet (http://www.pranarom.com).....	30
Figure 14	: Montage d'hydro diffusion(http://www.pranarom.com).....	30
Figure 15	: Hydrodistillation assistée par micro-ondes(http://www.pranarom.com).....	30
Figure 16	: schéma récapitulatif des deux procédés d'extraction d'huile végétale et des composés peptidiques et osidique du quinoa (Msika., 2010).....	30
Figure 17	: Structure du squalène (Herbillon Marie., 2015).....	34
Figure 18	: Structure de l'acide 3-O-b-D-glucopyranosyl oléanolique (Herbillon Marie., 2015)..	37

ABRÉVIATIONS

20 HE : 20 Hydroxy-Ecdysone

APG : Classification Phylo-Génétique des Angiospermes

FAO : Food and Agriculture Organisation

HAP : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique

HDL : High Density Lipoprotein (lipoprotéines à haute densité)

HE : Huile essentielle

HU : Unité provoquant l'Hémagglutination

ILSI : International Life Sciences Institute

LDL : Low Density Lipoprotein (lipoprotéines à faible densité)

ONU : Organisation des Nations Unies

TIU : Unité Inhibant la Trypsine

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

Introduction

Le quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) est une plante herbacée annuelle de la famille des *Amaranthaceae*. Originnaire de la région andine de l'Amérique du Sud. Elle a été domestiquée par les peuples autochtones il y a plusieurs milliers d'années. Cultivée depuis le niveau de la mer jusqu'à près de 4000 m d'altitude sur les hauts plateaux de la Cordillère des Andes, la plante s'est progressivement adaptée à la pauvreté des sols et aux conditions écologiques extrêmes. Principalement cultivé pour la consommation de ses graines qui sont souvent confondues avec celles des céréales comme le blé, le riz ou le maïs (monocotylédones de la famille des *Poaceae*), le quinoa est actuellement considéré comme une « pseudocéréale » (Herbillon Marie., 2015).

Le quinoa suscite un intérêt croissant en raison de la valeur nutritionnelle supérieure de ces graines par rapport aux céréales conventionnelles, notamment à cause de leur teneur élevée en protéines, mais aussi de ses effets bénéfiques probables sur la santé.

En effet, la santé humaine est de nos jours au cœur de toutes les préoccupations, avec notamment l'augmentation de la prévalence des troubles métaboliques comme l'obésité et le diabète, des maladies cardiovasculaires, de l'ostéoporose... Dans ce contexte, l'alimentation apparaît comme une stratégie abordable dans la prévention et le traitement de ces maladies. Les produits alimentaires qui confèrent des bienfaits spécifiques pour la santé sont appelés « aliments fonctionnels », leurs effets étant décrits comme allant de l'amélioration du bien-être général à la réduction du risque de maladies (Herbillon Marie., 2015).

Un grand nombre de recherches a récemment émergé sur les constituants chimiques contenus dans la graine de quinoa et leurs propriétés thérapeutiques, représentant cette culture comme une ressource importante pour le développement d'aliments fonctionnels. En plus des bienfaits pour la santé humaine apportés par la consommation de la graine, certains composés bioactifs ont montré des propriétés pharmacologiques intéressantes, laissant entrevoir de possibles applications dans le domaine pharmaceutique. La plante quinoa est aussi très demandée dans l'industrie du cosmétique et cela en utilisant ses sous-produits issus de cette plante, comme les saponines, les huiles essentielles et végétales (Msika., 2010).

Par ailleurs, ne contenant pas de gluten, le quinoa offre une alternative alimentaire précieuse pour les sujets souffrant de la maladie cœliaque.

Cependant, une utilisation plus courante des graines de quinoa dans l'alimentation humaine soulève un problème lié à la présence de facteurs dits « antinutritionnels ». Ces substances influent généralement de façon négative sur la croissance, la digestion et l'utilisation des nutriments. Des solutions doivent donc être mises en place afin de les éliminer, ou tout du moins atténuer leurs effets néfastes. Les plus connues de ces substances sont les saponines, des composés toxiques et amers concentrés dans l'enveloppe de la graine, qui doivent être éliminés par abrasion mécanique ou lavage avant la consommation (Herbillon Marie., 2015).

Nous proposons dans ce travail d'exposer les aspects botaniques de la plante du quinoa, puis nous citerons quelques techniques et procédés utilisés pour les principales extractions réalisables sur la plante du quinoa (saponines, huile essentielle et végétale, composés protéique et glucidique)

Nous répertorions également la composition chimique et valeurs nutritionnelle du quinoa, ainsi que les principales propriétés pharmacologiques et médicinales des composés bioactifs.

Pour terminer nous évoqueront les effets des substances antinutritionnels tout en discutant des différents moyens mis en œuvre pour les éliminer.

CHAPITRE I

EXPLORATION BOTANIQUE

Le quinoa (*Chenopodium quinoa*) est une espèce de plante herbacée annuelle de la famille des Amaranthaceae selon la classification phylogénétique ou de celle des Chenopodiaceae. C'est une pseudo-céréale, plutôt qu'une véritable céréale. Le quinoa est phylogénétiquement plus proche des espèces telles que la betterave, l'épinard et l'amarante (Herbillon Marie., 2015).

I. Origine et histoire du quinoa

Le quinoa est une plante originaire des Andes, et plus précisément des alentours du lac Titicaca, entre le Pérou et la Bolivie. Le quinoa constituait un aliment de base des populations précolombiennes, il fut néanmoins remplacé par les céréales à l'arrivée des Espagnols (Herbillon Marie., 2015).

D'après les témoignages historiques, il aurait été domestiqué par les peuples des Amériques entre 3 000 et 5 000 ans avant J.-C. Des traces de quinoa ont été retrouvées dans des tombes de Tarapacá, Calama et Arica au Chili, ainsi que dans différentes régions du Pérou (Herbillon Marie., 2015).

A l'époque de l'arrivée des Conquistadors, le développement technique du quinoa était bien avancé et réparti sur tout le territoire Inca et au-delà. Le premier Espagnol à évoquer la culture du quinoa est Pedro de Valdivia qui, en remarquant les cultures autour de Concepción, mentionne que les Indios se nourrissaient également de quinoa (Herbillon Marie., 2015).

Dans ses Commentaires royaux, Garcilaso de la Vega décrit le quinoa comme une des secondes céréales cultivées sur terre, ayant un aspect similaire au mil ou au riz à grains courts. Il rapporte également la première expédition de graines vers l'Europe, qui parviennent malheureusement mortes à destination, et donc incapables de germer, probablement à cause de la forte humidité subie durant la traversée (Herbillon Marie., 2015).

Plus tard, Cieza de León (1560) signale que le quinoa est cultivé sur les hauts plateaux de Pasto et de Quito, en ajoutant que peu de maïs, en revanche, beaucoup de quinoa était semé sur ces terres froides. Par ailleurs, dans ses chroniques sur La Paz, Patiño (1964) cite l'utilisation du quinoa comme source de nourriture chez les populations autochtones (Jimenes de l'Espada, 1885, II, 68). Enfin, Humboldt, durant sa visite en Colombie, affirme que le quinoa a toujours accompagné et suivi les habitants de Cundinamarca.

Domestication

Avant sa domestication, le quinoa sauvage servait probablement déjà de nourriture pour ses feuilles et ses graines. Des preuves de sa morphologie ont été retrouvées sur des poteries Tiahuanaco, représentant la plante du quinoa avec plusieurs panicules le long d'une même tige, ce qui suggérerait une des souches les plus primitives (FAO. 2014).

Du point de vue de sa variabilité génétique, le quinoa est une espèce oligocentrique avec un centre d'origine très vaste et une diversification multiple. La région andine et les rives du Lac Titicaca, en particulier, présentent la plus grande diversité et variation génétiques (FAO. 2014).

Le quinoa a subi de nombreuses transformations morphologiques durant sa domestication et comme produit des activités humaines, notamment une inflorescence plus compacte à l'extrémité de

la plante, une augmentation de la taille de la tige et des graines, la perte des mécanismes de dispersion des graines et de hauts niveaux de pigmentation (FAO. 2014).

Durant la domestication, les populations andines ont manifestement sélectionné les génotypes en fonction de leur utilisation et de leur tolérance aux facteurs biotiques et abiotiques adverses, pour aboutir aux plantes et écotypes d'aujourd'hui, dotés de différentes caractéristiques: le Chullpi pour les soupes, le Pasankalla à griller, le Coytos pour la farine, le Reales pour la pissara, l'Utusaya pour sa résistance à la salinité, le Witullas et l'Achachinos pour leur résistance au froid, le Kcancollas pour sa résistance à la sécheresse, le Quellus ou graine jaune pour son rendement élevé, le Chewecas pour sa résistance à l'humidité excessive, l'Ayaras pour sa valeur nutritionnelle (bon équilibre acides aminés essentiels-protéines) et le Ratuquis pour sa précocité (FAO. 2014).

II. Etude botanique

1. Classification

1.1. Classification scientifique

Le quinoa est une plante dicotylédone angiosperme de la famille des Chenopodiaceae. Depuis 2009, une nouvelle classification dite phylogénétique (APG III) range le quinoa dans la famille des Amaranthaceae, mais nous continuerons de nous référer à la classification de Cronquist (Tableau 1).

Tableau 1: Classification scientifique du quinoa

Classification de Cronquist (1981)	
Règne	Plantae
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsidae
Sous-classe	Caryophyllidae
Ordre	Caryophyllales
Famille	Chenopodiaceae
Genre	Chenopodium
Classification APG III (2009)	
Ordre	Caryophyllales
Famille	Amaranthaceae
Nom binomial	
<i>Chenopodium quinoa</i> Willd., 1798	

Au sein de cette famille, le quinoa appartient au genre *Chenopodium*, qui présente une large distribution mondiale et dont le nombre d'espèces n'a cessé d'évoluer au cours de la domestication des cultures (modifications morphologiques et physiologiques sous l'influence de l'environnement, sélection de nouvelles variétés, manipulations génétiques...). Si le nombre de 250 espèces a été annoncé il y a une quarantaine d'années (Giusti, 1970), on peut aujourd'hui estimer ce chiffre à près d'un millier d'espèces. Ce genre inclut des espèces de consommation courante telles que les épinards (*Spinacia oleracea* L.) ou la betterave (*Beta vulgaris*).

1.2. Classification morphologique

Les premières classifications du quinoa prenaient en compte la couleur de la plante et des fruits, parfois même la forme du fruit ou le goût des grains. Quatre espèces de quinoa ont été décrites : *Chenopodium album*, caractérisé par des grains doux, *Chenopodium pallidus* aux grains amers, *Chenopodium ruber* aux grains rouges et *Chenopodium niger* aux grains noirs (Tapia et al., 1979). Par la suite, ce sont les caractéristiques morphologiques qui ont été considérées, conformément aux normes taxonomiques.

Malgré la large variation morphologique observée, les botanistes qui ont étudié la taxonomie du quinoa sont convenus qu'il pouvait être considéré comme une espèce unique au sein du genre *Chenopodium* (Tapia et al., 1979). Des études ultérieures menées sur un vaste matériel recueilli le long de la Cordillère des Andes ont conclu que les variations observées dans les différentes vallées atteignaient un degré de sous-espèce (Gandarillas, 1974), cependant pour des raisons pratiques, nous parlerons plutôt de « variété ». La plus grande collection de variétés différentes se trouve au Pérou et en Bolivie avec plus de 2000 échantillons chacun ; mais d'autres existent en Argentine, en Colombie, au Chili, en Equateur, en Angleterre, aux Etats-Unis et dans l'ex-Union soviétique (Valencia-Chamorro, 2003).

Cette grande variabilité rend toute classification difficile, la plus détaillée rapporte 17 variétés différentes identifiées à partir d'échantillons de quinoa collectés en Equateur, au Pérou et en Bolivie. Celles-ci ont été réparties dans deux catégories déterminées par le type d'inflorescence : glomériforme et amaranthiforme, la première correspondant certainement à la forme ancestrale qui aurait donné la seconde par mutation (Gandarillas, 1968a ; Tapia et al., 1979):

- Glomériforme: petits groupes de fleurs issus d'axes tertiaires (variétés : *Cajamarca*, *Copacabana*, *Cuzco*, *Challapata*, *Cochabamba*, *Sicuani*, *Junín*, *Ancash*, *Glorieta*, *Dulce*)
- Amaranthiforme: glomérules provenant d'axes secondaires (variétés : *Achacachi*, *Puno*, *Real*, *Potosi*, *Puca*, *Sucre* et *Pichincha*)

2. Ecotypes

On entend par écotype l'ensemble des variétés d'une espèce donnée qui ont développé des adaptations morphologiques et physiologiques particulières à l'écosystème dans lequel elles vivent, sans pour autant qu'il y ait de changement dans leur matériel génétique, et qui se transmettent à leur descendance (Vassas et Vieira Pak, 2010).

Selon FAO (2012), la répartition géographique du quinoa va de 5° de latitude nord au sud à 43° de latitude sud (Colombie, Équateur, Pérou, Bolivie, Argentine et Chili). A savoir qu'en 2010 l'altiplano, sud Bolivien est devenu le plus grand exportateur de quinoa au monde (Vassas et Vieira Pak, 2010).

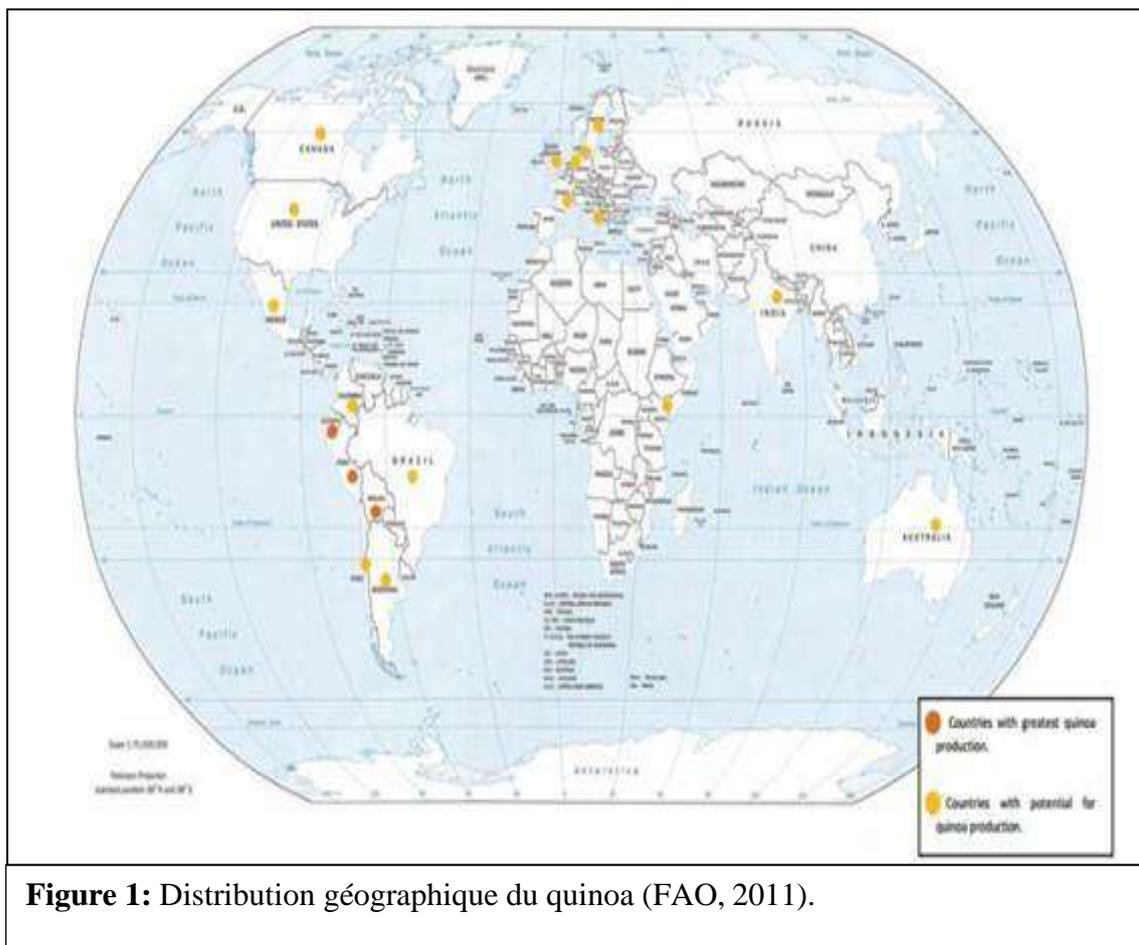


Figure 1: Distribution géographique du quinoa (FAO, 2011).

3. Morphologie

3.1. Caractères végétatifs

3.1.1 Les racines

En raison de l'absence d'une période de dormance des graines, la germination du quinoa est extrêmement rapide, elle s'initie en seulement quelques heures en présence d'une humidité de sol adéquate. La radicule s'allonge en première, puis continue de croître pour donner lieu à une racine pivotante pouvant atteindre 30 cm de profondeur et à partir de laquelle vont se développer des racines secondaires et tertiaires, desquelles se forment des radicelles pouvant également se ramifier (Figure 2) (Gandarillas, 1979 ; Mujica et *al.*, 2001).

Ce système racinaire est très robuste, il peut soutenir des plantes de plus de 2 m de hauteur bien que de rares cas d'affaissement des plants aient pu être observés sous l'effet du vent, d'une humidité excessive ou du poids de leurs panicules (Gandarillas, 1979 ; Mujica et *al.*, 2001).

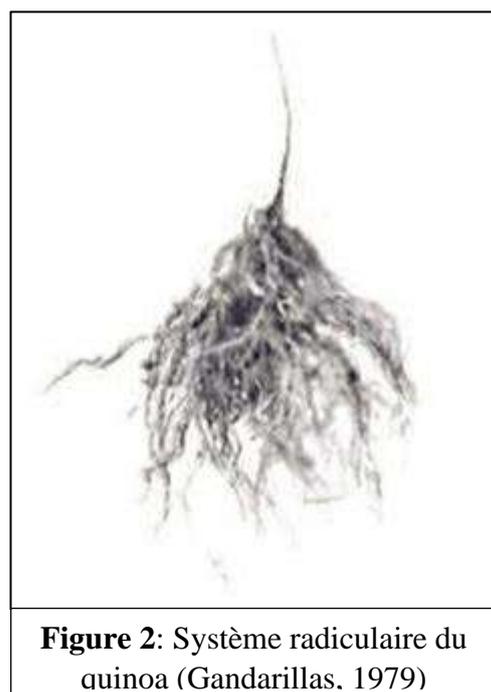


Figure 2: Système racinaire du quinoa (Gandarillas, 1979)

3.1.2 La tige

La tige est cylindrique au niveau du collet puis devient plus anguleuse à partir des ramifications avec une position alterne des feuilles le long de chacune des quatre faces. Elle peut être unique ou bien présenter de nombreuses ramifications. Son diamètre varie entre 1 et 8 cm, et sa hauteur entre 50 cm et 2 m, selon les variétés et les conditions de culture comme la densité d'ensemencement ou la fertilisation (Mujica et *al.*, 2001).

La couleur de la tige est également très variable. Elle peut être uniformément verte, verte avec des aisselles colorées (surtout rouges), verte avec des stries violettes ou rouges, ou bien uniformément rouge. (Gandarillas, 1979).

3.1.3 Les ramifications

Les branches naissent à l'aisselle de chaque feuille sur la tige. Leur longueur varie selon la variété et les conditions environnementales, allant de quelques centimètres jusqu'à une longueur équivalente à celle de la tige principale (Jacobsen et Stolen, 1993).

Il existe des génotypes très ramifiés (quinoa des vallées), parfois même à partir de la base (quinoa du niveau de la mer), tandis que d'autres présentent une tige unique (quinoa des hautes plaines). Il existe également des génotypes intermédiaires (Mujica et *al.*, 2001).

3.1.4 Les feuilles

Les feuilles sont alternes et se composent d'un pétiole et d'un limbe. Les pétioles sont longs, fins et cannelés sur la face supérieure et de longueur variable au sein de la même plante. Le plus souvent, les limbes sont plans mais ils peuvent parfois être ondulés. Les feuilles inférieures sont grandes, jusqu'à 15 cm, rhomboïdales (en forme de losange) ou triangulaires ; tandis que les feuilles supérieures sont petites, d'environ 10 mm, lancéolées ou triangulaires (Mujica et *al.*, 2001).

La couleur des feuilles varie en fonction des génotypes, elles sont généralement vertes lorsqu'elles sont jeunes puis elles virent au jaune, rouge ou violet. Ces couleurs sont le résultat de la présence de pigments végétaux appelés bétalaïnes qui sont de deux types : bétacyanines (rouge-violet) et bétaxanthines (jaune) (Gallardo et *al.*, 1996).

3.2 Caractères floraux

3.2.1 L'inflorescence

L'inflorescence est une panicule typique (Figure 3), c'est-à-dire une inflorescence composée d'un axe principal d'où émergent des axes secondaires et tertiaires (Risi et Galwey, 1984). Il a été décrit deux types d'inflorescences chez le quinoa : glomérulaire et amaranthiforme (Figure 4).

Chez le type glomérulaire, les glomérules (courtes ramifications portant un groupe de fleurs) sont insérées sur les axes tertiaires prenant naissance à partir des axes secondaires, tandis que chez le type amaranthiforme, ils sont directement insérés sur des axes secondaires (Bertero et *al.*, 1996).

Dans les deux cas, l'inflorescence peut être plus ou moins compacte, cela dépend de la longueur des axes secondaires, tertiaires et des pédicelles ; les inflorescences compactes ayant à la fois des axes et des pédicelles courts (Jacobsen et Stolen, 1993), même si d'une façon générale, les inflorescences glomérulées ont une apparence beaucoup plus compacte que les amaranthiformes (Figure 5).



Figure 3: Panicules de Quinoa

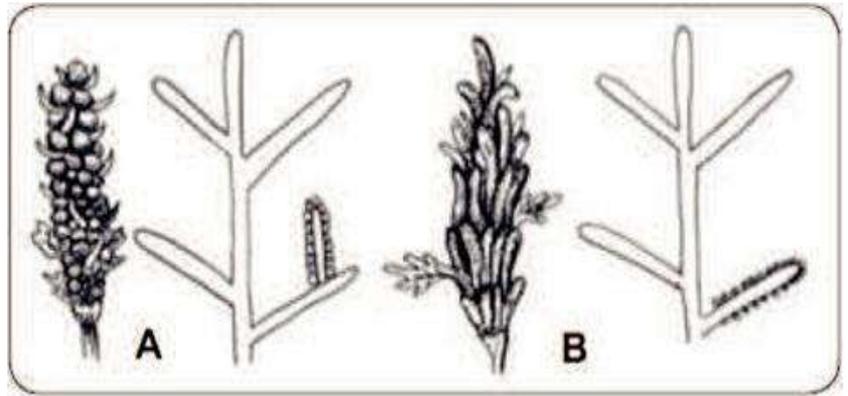


Figure 4: Les formes d'inflorescences du quinoa (Tapia et Fries, 2007)

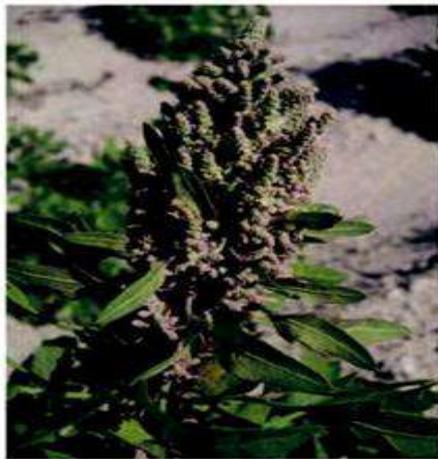


Figure 5 : Inflorescence Amaranthiforme et Glomérulaire (IRD)

3.2.2 Les fleurs

Tous les membres de la famille des Chenopodiaceae, y compris le genre *Chenopodium*, présentent des fleurs incomplètes, sessiles et dépourvues de pétales (Jacobsen et Stolen, 1993). Une caractéristique importante du quinoa est la présence de fleurs femelles unisexuées localisées à l'extrémité distale d'un groupe, et de fleurs hermaphrodites localisées à l'extrémité proximale (Hunziker, 1943 ; Valencia-Chamorro, 2003) (Figure6).

La fleur hermaphrodite est constituée d'un périgone sépaloïdes (cinq sépales), d'un gynécée (ou pistil) avec un ovaire ellipsoïdal et deux ou trois stigmates entourés par l'androcée, lui-même composé de cinq étamines recourbées et courtes. La fleur femelle se compose seulement d'un périgone et d'un gynécée. La taille de la première varie entre 2 et 5 mm contre 1 à 3 mm pour la seconde. Le pourcentage de chacune d'elle dans le glomérule dépend de la variété (Gandarillas, 1979).

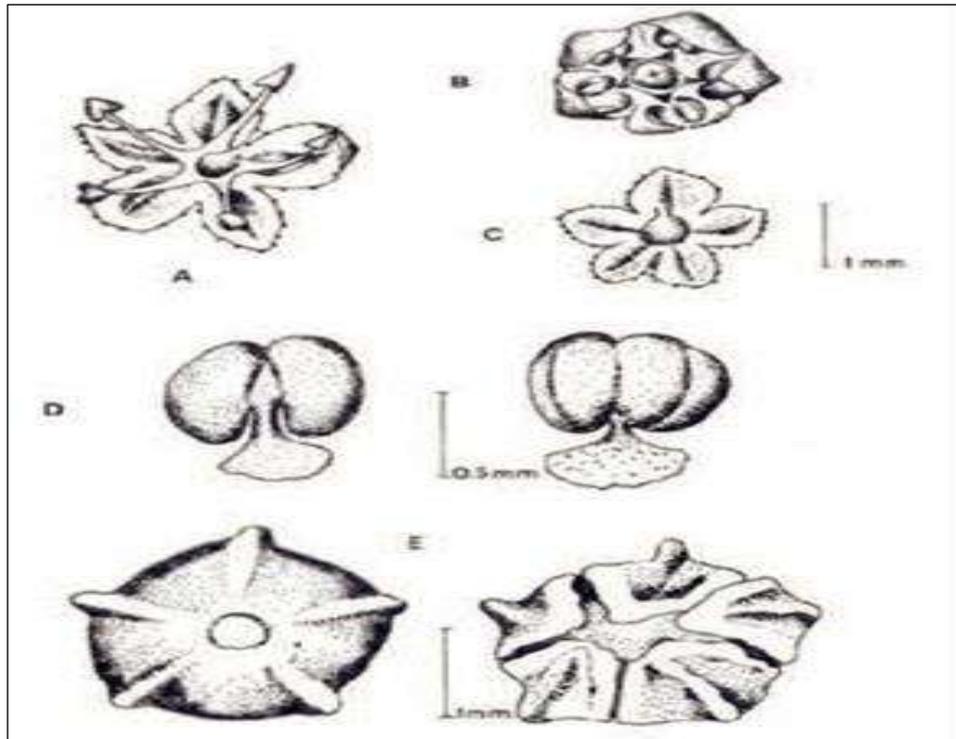


Figure 6 : Fleurs hermaphrodites et femelles du quinoa (Gandarillas, 1979)

- A) Fleur hermaphrodite en période d'anthèse ;
 B) Fleur hermaphrodite avant l'anthèse ;
 C) Fleur femelle ;

3.3 Les fruits et les graines

Le fruit est un akène comprenant plusieurs couches, à savoir de l'extérieur vers l'intérieur : périgone, péricarpe et épisperme. Chaque fruit contient une seule graine dont la couleur, la forme et la taille sont variables (Risi et Galwey, 1984).

Il existe trois formes de graines : conique, cylindrique et ellipsoïdale ; qui pourraient être réparties dans trois catégories de taille : grande taille (2,2 à 2,6 mm), taille moyenne (1,8 à 2,1 mm) et petite taille (< 1,8 mm) (Quispe et *al.*, 1976).

Les différentes couleurs du périgone, du péricarpe et de l'épisperme (Tableau 2) sont la raison pour laquelle l'inflorescence du quinoa présente autant de couleurs variées (Gandarillas, 1979)

Tableau 2 : Colorations dans le fruit du quinoa

Périgone	Péricarpe	Episperme
Vert	Translucide	Translucide
Rouge	Blanc sale	Blanc
Pourpre	Blanc opaque	Café
	Jaune clair	Brun foncé
	Jaune intense	Marron-noir
	Orange	Noir brillant
	Rosâtre	
	Rouge vermillon	
	Cerise	
	Café	
	Gris	
	Negro	

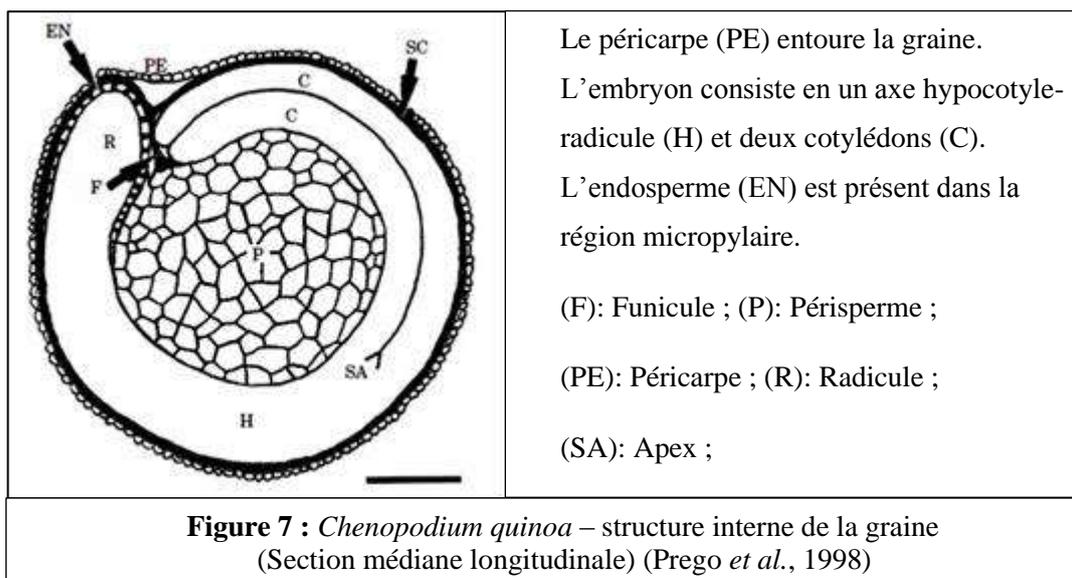
Le périgone se détache facilement à maturation, par lavage ou par frottement à l'état sec bien que, dans certains cas, il peut rester attaché à la graine même après battage. Dans la région ventrale de l'akène, on observe une cicatrice, le hile, qui correspond à l'insertion du fruit dans le réceptacle floral (Gandarillas, 1979 ; Mujica *et al.*, 2001)

Le péricarpe du fruit adhère à la graine et est éliminé par décortilage abrasif avant la consommation. Juste en dessous du péricarpe, l'épisperme entoure la graine en formant une membrane très mince (Valencia-Chamorro, 2003).

L'embryon, constitué de deux cotylédons et de la radicule, est localisé en périphérie de la graine et enveloppe le péricarpe comme un anneau. Il peut constituer jusqu'à 60% du poids de la graine et représente 30% du volume total de la graine (Valencia-Chamorro, 2003).

Le péricarpe est le principal tissu de stockage des graines de quinoa et représente pratiquement 60% de la superficie de la graine (Mujica *et al.*, 2001).

On trouve la présence d'un endosperme entourant complètement l'embryon, et séparé de lui par une couche d'air (Figure 7). Après que la semence ait été hydratée, il est probable que les cellules de l'endosperme soient mises en contact avec l'embryon qui le consomme rapidement au cours de sa croissance (Gallardo *et al.*, 1997).



4. Cultivation

Les graines de quinoa doivent être semées dans un sol humide, bien préparé, désherbé (manuel ou mécanique à l'aide d'une technique de faux semis) et surélevé (pour éviter l'engorgement) (Singh, 2019 ; Jacobsen, 2015 ; L'Avenir Agricole, 2015). Les graines étaient traditionnellement répandues dans les régions andines mais il est recommandé de semer en rangées car cela facilite les opérations de désherbage et de récolte. Les graines doivent être semées à une profondeur de 3 cm et le sol doit être bien tassé. La densité des graines peut être variable : un intervalle d'espacement de 40 à 50 cm entre les rangées (correspondant à 6-8 kg de graines / ha) (Singh, 2019).

Le désherbage est recommandé pendant les premiers stades de développement du quinoa car les plants se développent lentement et peuvent être étouffés par les mauvaises herbes. Il est possible d'irriguer le quinoa mais seulement après le stade 2-3 feuilles (Singh, 2019).

Le quinoa est une culture à croissance rapide qui ne nécessite pas plus de 90 jours pour mûrir et être récoltée. La détermination de la date de récolte est importante. La récolte ne doit pas être retardée, surtout lorsque le temps nuageux et pluvieux est susceptible de se produire, car l'humidité peut déclencher la germination des graines sur la plante et altérer la qualité du grain. Une autre raison pour ne pas retarder la récolte est que la récolte sur des graines mûres entraîne des pertes importantes de graines car les graines tombent de la panicule pendant la récolte (Singh, 2019).

5. Utilisation

Les graines de quinoa (céréales) sont utilisées comme aliments de base ou comme céréales alternatives riches en énergie et sans gluten, à haute teneur en protéines, en acides aminés essentiels précieux, en vitamines, en minéraux et en antioxydants naturels. Le grain de quinoa peut être cuit (bouilli) de la même manière que le riz et fournit une nourriture savoureuse, moelleuse et moelleuse avec une saveur de noix (Lim, 2013).

Il peut être ajouté aux soupes, ragoûts ou "tamales". Le grain de quinoa peut être utilisé comme céréale pour le petit-déjeuner ou il peut être moulu pour faire du porridge ou de la farine et est ensuite utilisé en boulangerie pour faire du pain, des crêpes, des pâtisseries et des biscuits. Il peut remplacer partiellement le blé dans les pains de pain (Lim, 2013). Étant sans gluten, le grain de quinoa est inclus dans de nombreuses recettes alimentaires destinées aux personnes atteintes de la maladie cœliaque (intolérance au gluten) et est bien accepté par les consommateurs (Lim, 2013).

Le grain peut être fermenté pour préparer des boissons chaudes ou froides et de la bière. Il peut être utilisé dans la préparation de la chicha, boisson de référence en Amérique du Sud (Metheny et al., 2015). Une boisson nutritive composée d'un mélange de céréales de quinoa, de mesquite (*Prosopis chilensis*) et de lupin (*Lupinus albus*), aromatisée à la pulpe de framboise, a été utilisée pour la renutrition des enfants sous-alimentés (Cerezal Mezquita et al., 2012).

Le quinoa possède des propriétés fonctionnelles qui en font un ingrédient technologique précieux pour l'industrie alimentaire (Abugoch James, 2009). Le quinoa donne une huile précieuse riche en acides gras polyinsaturés et en vitamine E (Lim, 2013). Les feuilles de quinoa sont utilisées comme potiron. Ils peuvent être consommés crus en salade ou cuits comme des épinards (Ecocrop, 2019 ; Maughan et al., 2007). Le quinoa d'oreille peut être préparé dans des cornichons (Lim, 2013). Les feuilles, les tiges et le grain ont des usages médicaux (Hernandez Bermejo et al., 1994)

Le grain de quinoa, les parties végétatives, les résidus de culture et les sous-produits de transformation peuvent être utilisés pour nourrir le bétail (Blanco Callisaya, 2015). Toutes les parties de l'usine de quinoa ont été nourries aux camélidés avant l'invasion du Conquistador. Après l'invasion, il a été donné à des bovins, des moutons, des porcs et des oiseaux (Hernandez Bermejo et al., 1994). La culture de quinoa fournit une gamme d'aliments pour les animaux de la ferme :

- Les feuilles fraîches, les paillettes peuvent être utilisées comme fourrage frais ou elles peuvent être ensilées (Baskota et al., 2017 ; Montoya Restrepo et al., 2005) ;
- Les tiges, les morceaux de feuilles, les épis, la panicule pleine, les fleurs et les pédicelles sont donnés aux ruminants et aux camélidés et aux porcs (Capelo Baez, 1979 ; Cardozo, 1968) ;
- Les grains cassés jetés peuvent être donnés à toutes les classes d'animaux domestiques, y compris les cobayes et les poissons (Blanco Callisaya, 2015)
- Le son de quinoa est utilisé dans l'Altiplano pour nourrir les camélidés, les cobayes et les moutons (Aduviri Paredes, 2006)

CHAPITRE III

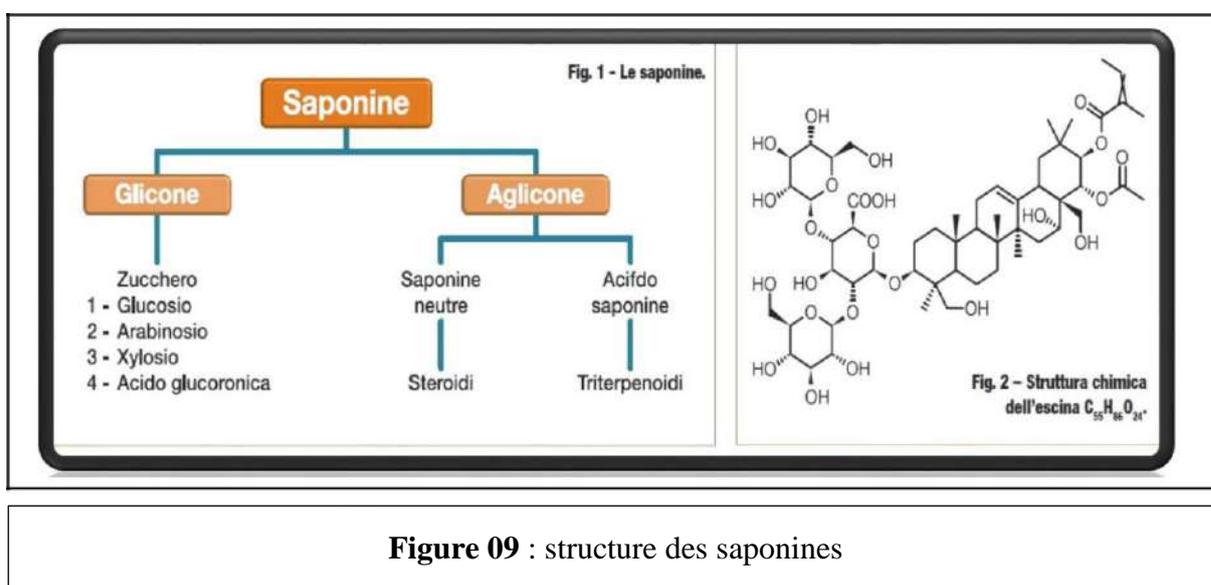
TECHNIQUES ET PROCÉDÉS D'EXTRACTIONS

I. Extraction des saponines

1. Généralités

Le nom saponine dérive du mot latin « sapo », qui signifie savon, parce que ces composés moussent une fois agités avec de l'eau. Structuralement parlant, les saponines sont constituées d'un squelette stéroïdique ou triterpénique (aglycones non polaires) porteur d'une ou de plusieurs sections sucres, de masse moléculaire entre 600 à 2000 Daltons et de structure complexe (figure 8) (Bruneton, 2009).

Cette combinaison d'éléments structuraux polaires et non polaires explique leur comportement moussant en solution aqueuse. La nature des sections osidiques retrouvées à l'intérieur des saponines est très variée, mais elles sont habituellement constituées de D-glucose, D-galactose, L-rhamnose, D-xylose, D-fucose et acide D-glucuronique (Bruneton, 2009)



Ces métabolites manifestent plusieurs propriétés pharmacologiques, hémolytiques, antimicrobiennes, insecticides, anti-inflammatoires, antalgiques (Vincken *et al.*, 2007), réduction du cholestérol et effet cardiovasculaire, activité antivirale. Les saponines triterpénoïdes de la famille des *Fabaceae* ont montré une activité anti-herpétique (Vincken *et al.*, 2007) et leur structure influencerait sur cette activité. Ainsi, elles sont employées dans la phytothérapie et dans l'industrie cosmétique (Estrada *et al.*, 2000).

2. Procédé d'extraction

2.1 Mise en évidence des saponines

La détermination des saponines peut être réalisée selon la méthode décrite par (Ncube *et al.*, 2011). Dix millilitres d'eau distillée sont ajoutés à 0,1 g de poudre d'échantillons dans des tubes à essai. Les tubes à essai sont en suite agités pendant 2 min. 15 min après quelque goutte d'huile d'olive sont ajoutées. L'apparition d'une mousse stable et persistante sur la surface du liquide pendant 15 min indique la présence de saponines (Tadhani et Subhash, 2006).

2.1 Extraction des saponines

2.1.1 Extraction Alcoolique

Cette méthode consiste on la macération successive de la poudre végétale par des solvant de polarité différentes : l'eau, l'acétate d'éthyle et le méthanol. La quantité de solvant doit être appropriée à la quantité de matière végétale disponible (aproximativement 1,5 l de solvant pour 250 g de poudre) (Msika Philipe., 2010).

L'extraction c'effectuée trois fois pour chaque solvant sous agitation continue à température ambiante durant 72 heures. Après filtration, évaporation du solvant et séchage à l'étuve à 40°, on obtient les extraits bruts (Msika Philipe., 2010).

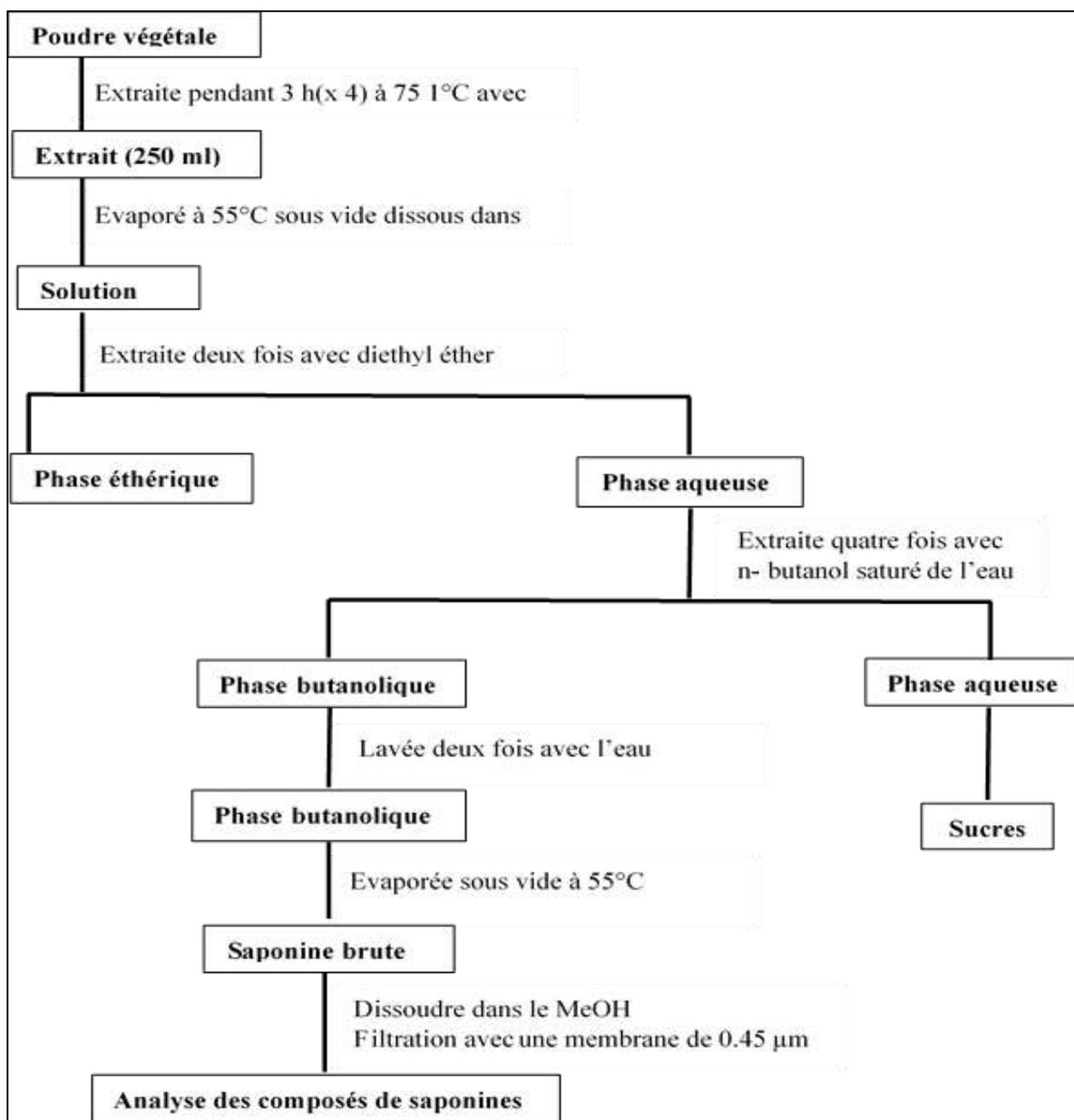


Figure 10: Procédure pour l'extraction et la séparation de saponines à partir de la poudre végétale (Msika Philipe . 2010).

2.1.2 Extraction aqueuse

L'extrait aqueux est fait selon la méthode de (Estrada *et al.*, 2000). La poudre de *C. quinoa* mélangée avec de l'eau distillée, sous agitation à 60 °C pendant 24h, filtrée et évaporée à sec à 45 °C (Msika Philipe, 2010).

Les poudres issues après l'évaporation des solvants et de l'eau conservées à 4 °C sont utilisées pour les différents tests.

2.2 Dosage des saponines totales

La méthode utilisée pour le dosage des saponines totales est celle de (Shiau *et al.*, 2009). 50 µl de solution aqueuse de chaque extrait (dissout dans l'éthanol) est rajoutée à 250 µl de vanilline à 8%. Les tubes sont placés dans un bain d'eau glacée, rajoutés 2,5 ml de l'acide sulfurique à 72% délicatement dans la paroi, passé au vortex puis incubés pendant 3 minutes et portés au bain marie à 60 °C pendant 10 minutes puis refroidis.

L'absorbance est mesurée à 544 nm contre un blanc de réactifs (éthanol + vanilline 8% + acide sulfurique 72%).

Le calcul de concentration peut se faire selon une courbe d'étalonnage réalisée par la Déosgénine (une saponine stéroïdienne) figure n°10

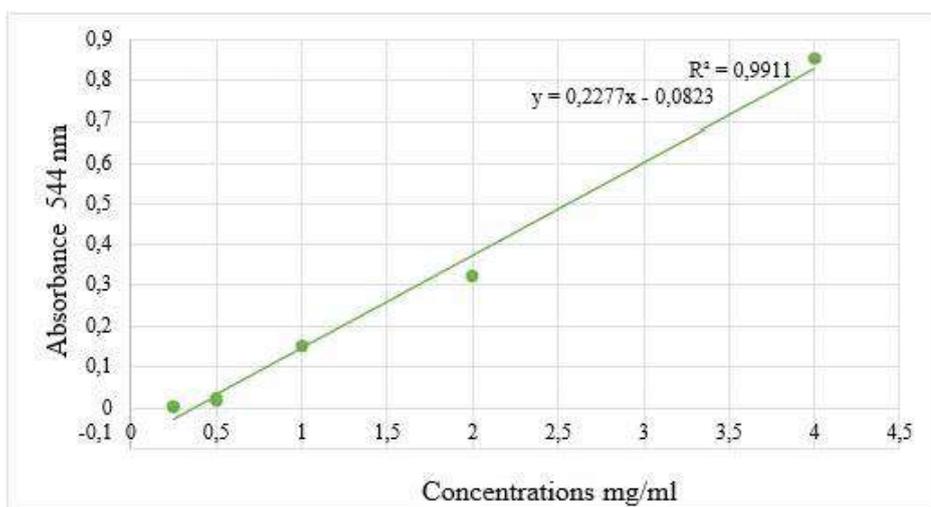


Figure11 : Courbe d'étalonnage (dosage des saponines totales) (Msika Philipe, 2010).

II. Les huiles essentielles

Le terme huiles essentielles (HEs) dérive de « quinta essentia », un nom donné par le médecin suisse Paracelsus aux extraits de plantes obtenues par distillation, il signifie la fragrance et la quintessence de la plante (Khenaka., 2011).

Ces essences végétales sont largement distribuées dans le règne végétal et n'existent que chez les végétaux supérieurs. En effet, elles se trouvent en quantité appréciable chez environ 2000 espèces réparties en 60 familles botaniques comme par exemple chez les Lamiacées (lavande, basilic, menthe, ...), les Myrtacées (eucalyptus, ...), les Lauracées (cannelle et sassafras) et les Apiacées (coriandre, cumin, fenouil, persil, ...) (Ritcher., 1993). Elles se trouvent dans tous les organes de la plante : racines, fruits, graines, fleurs, feuilles, écorces, bois, etc. Elles se forment dans des cellules spécialisées, le plus souvent, regroupées en canaux ou en poches sécréteurs et elles sont ensuite transportées dans les différentes parties de la plante, lors de la croissance de cette dernière (Bernad., 1988).

Beaucoup de travaux sont réalisés dans ce sens, du fait de l'importance incontestable des huiles essentielles dans divers secteurs économiques, comme par exemple, l'industrie de la parfumerie et de la cosmétique, l'industrie alimentaire, l'industrie pharmaceutique et plus particulièrement, la branche de l'aromathérapie qui utilise leurs propriétés bactéricides et fongicides (Bakkali.,2008)

1. Définition

Il s'agit d'un extrait pur et naturel provenant de plantes aromatiques (Roulier, 1990 ; Wegrzyn., 2005). Elle concentre l'essence de la plante, autrement dit son parfum. Il s'agit de substances odorantes, volatiles, de consistance huileuse, très concentrées, offrant une forte concentration en principes actifs (Lardry et Heberkorn., 2007). Il faut ainsi une très grande quantité de plantes fraîches pour obtenir quelques millilitres d'huiles essentielles (Nogaret., 2008).

2. Procédés d'extraction des huiles essentielles

Le choix d'une technique d'exploitation des plantes aromatiques doit être adapté aux composés spécifiquement recherchés ; en principe cela ne dépend pas du type d'organe utilisé (feuille, fleur, bois, graine ou fruit, racine ou rhizome), à l'état frais ou à l'état sec.

La méthode dépend du type de produit souhaité, ou de la nature chimique des molécules recherchées (Boutekedjiret., 1999) le rendement en l'huile et la fragilité de certains constituants des huiles aux températures élevées (Hellal., 2011). Elles sont obtenues par hydrodistillation, expression à froid, comme les agrumes (Burt, 2004). De nouvelles techniques permettant d'augmenter le rendement de production, ont été développées, comme l'extraction au moyen de dioxyde de carbone liquide à basse température et sous haute pression (Santoyo et *al.*, 2005) ou l'extraction assistée par ultrasons ou micro-ondes (Kimbaris *et al.*, 2006).

2.1 Hydrodistillation

Il s'agit de la méthode la plus simple et la plus anciennement employée pour extraire les huiles essentielles. Le procédé consiste à immerger le matériel végétal dans un récipient rempli d'une quantité adéquate d'eau. Le tout est ensuite porté à l'ébullition (figure 11).

La chaleur permet l'éclatement des cellules végétales et la libération des molécules odorantes qui y sont contenues. L'HE forme avec la vapeur d'eau, un mélange azéotrope. Puis, les vapeurs sont condensées au moyen d'un réfrigérant. Dans un autre récipient de collecte, l'huile essentielle se sépare de l'eau par différence de densité. L'HE étant plus légère que l'eau, elle surnage au-dessus de l'hydrolysât. Cependant, l'hydro distillation possède des limites. En effet, un chauffage prolongé et trop puissant engendre la dégradation de certaines molécules aromatiques (Lucchesi., 2005). Au laboratoire, le système équipé d'une cohobe généralement utilisé pour l'extraction des huiles essentielles est le Clevenger.

2.2 Entraînement à la vapeur d'eau

La distillation par entraînement à la vapeur d'eau, cette technique ne met pas en contact direct l'eau et la matière végétale à traiter (figure 12). Le principe de la distillation à la vapeur d'eau consiste à faire passer la vapeur d'eau à travers la plante à une température adéquate pour détruire les cellules végétales, libérer les molécules aromatiques et les entraîner dans un serpentin de refroidissement. Les vapeurs refroidies retournent à l'état liquide formant un mélange « eau + huile essentielle ». Recueillies dans un essencier, l'huile essentielle et l'eau florale se séparent par simple différence de densité. L'absence de contact direct entre l'eau et la matière végétale, puis entre l'eau et les molécules aromatiques évite certains phénomènes d'hydrolyse ou de dégradation pouvant nuire à la qualité de l'huile (Neffati, .2010).

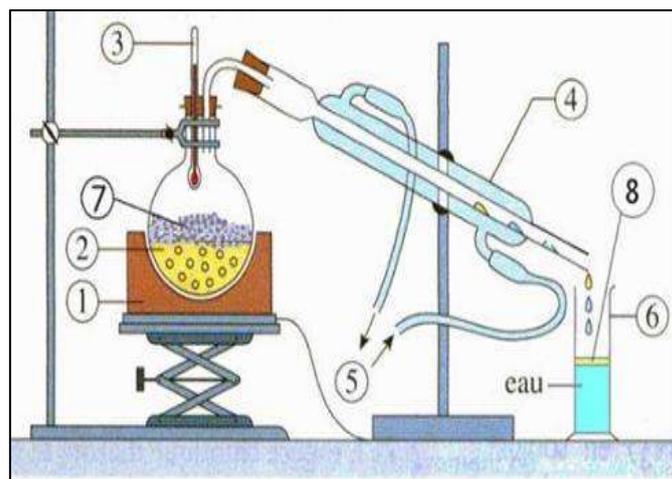
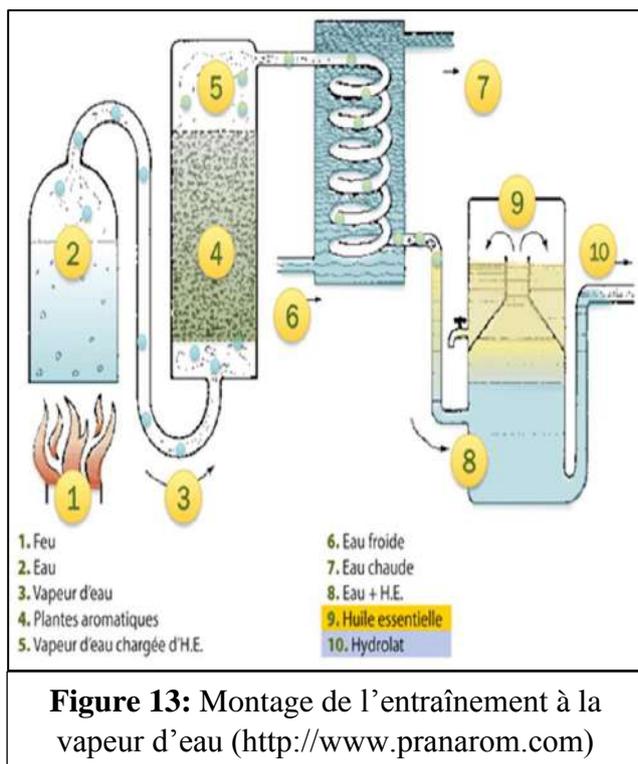


Figure 12: Schéma du principe de la technique d'hydro distillation (Lucchesi M. E. 2005)

- | | |
|-------------------|--|
| 1- Chauffe ballon | 5- Entrer et sortie d'eau de refroidissement |
| 2- Ballon | 6- Epreuve graduée |
| 3- Thermomètre | 7- Matière à extraire l'essence |
| 4- Réfrigérant | 8- La couche d'HES |

2.3 Extraction par solvants volatils

La technique d'extraction « classique » par solvant, consiste à placer dans un extracteur un solvant volatil et la matière végétale à traiter. Grâce à des lavages successifs, le solvant va se charger en molécules aromatiques, avant d'être envoyé au concentrateur pour y être distillé à pression atmosphérique (figure 13).

L'extraction par solvant organique volatil reste la méthode la plus pratiquée. Les solvants les plus utilisés à l'heure actuelle sont l'hexane, le cyclohexane, l'éthanol, le méthanol, le dichlorométhane et l'acétone (Kim.N.S, D.S. Lee. J. Chrom. A. 2002) Le solvant choisi, en plus d'être autorisé devra posséder une certaine stabilité face à la chaleur, la lumière ou l'oxygène, sa température d'ébullition sera de préférence basse afin de faciliter son élimination, et il ne devra pas réagir chimiquement avec l'extrait. L'extraction est réalisée avec un appareil de Soxhlet ou un appareil de Lickens-Nickerson.

Ces solvants ont un pouvoir d'extraction plus élevé que l'eau si bien que les extraits ne contiennent pas uniquement des composés volatils mais également bon nombre de composés non volatils tels que des cires, des pigments, des acides gras et bien d'autres substances (Boutekedjiret.C, 1999).

L'emploi restrictif de l'extraction par solvants organiques volatils se justifie par son coût, les problèmes de sécurité et de toxicité, ainsi que la réglementation liée à la protection de l'environnement. Cependant, les rendements sont généralement plus importants par rapport à la distillation et cette technique évite l'action hydrolysant de l'eau ou de la vapeur d'eau .(Boutekedjiret c,1999).

2.4 Hydro-diffusion

Cette technique est relativement récente. Elle consiste à faire passer, du haut vers le bas (perdescendum) et à pression réduite, la vapeur d'eau au travers de la matrice végétale.

L'avantage de cette méthode est d'être plus rapide donc moins dommageable pour les composés volatils (figure 14). Cependant, l'huile essentielle obtenue avec ce procédé contient des composés non volatils ce qui lui vaut une appellation spéciale : « essence de percolation » (Franchomme, 1990 ; Richard, H., 1992).

De plus, l'hydro diffusion permet une économie d'énergie due à la réduction de la durée de la distillation et donc à la réduction de la consommation de vapeur.

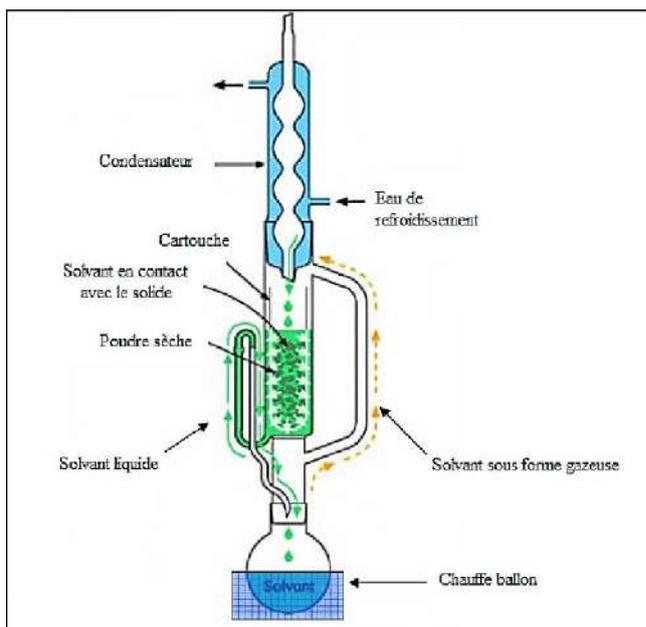


Figure 14: Schéma de l'appareillage

(<http://www.pranarom.com>)

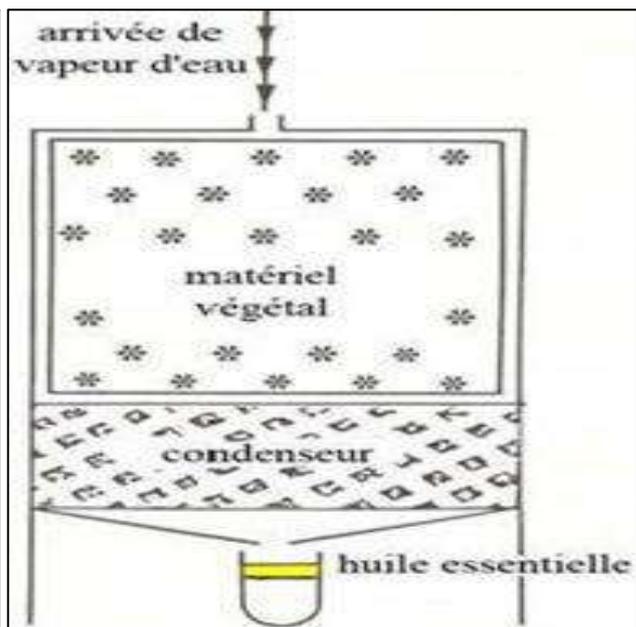


Figure 15 : Montage d'hydro diffusion

(<http://www.pranarom.com>)

2.5 Extraction par fluide supercritique

Extraction par fluides supercritiques a pris ces dernières années, beaucoup d'essor concernant l'extraction des extraits végétaux. Le principal avantage de cette technique est celui de combiner les caractéristiques des gaz et des liquides pendant le processus d'extraction (figure 15). En outre tous les processus de dégradation possibles tels que l'oxydation ou isomérisation sont réduits au minimum du fait que le temps d'extraction y'est réduit. Toutefois, cette technique d'extraction présente un inconvénient la basse polarité du dioxyde de carbone supercritique qui le solvant d'extraction le plus employé. Au-delà du point critique ($P= 73,8$ bars, $T^{\circ}= 31,1^{\circ}C$), le CO_2 possède les propriétés intermédiaires entre celles des liquides et celles des gaz, ce qui lui confère un bon pouvoir d'extraction (Piochon, 2008).

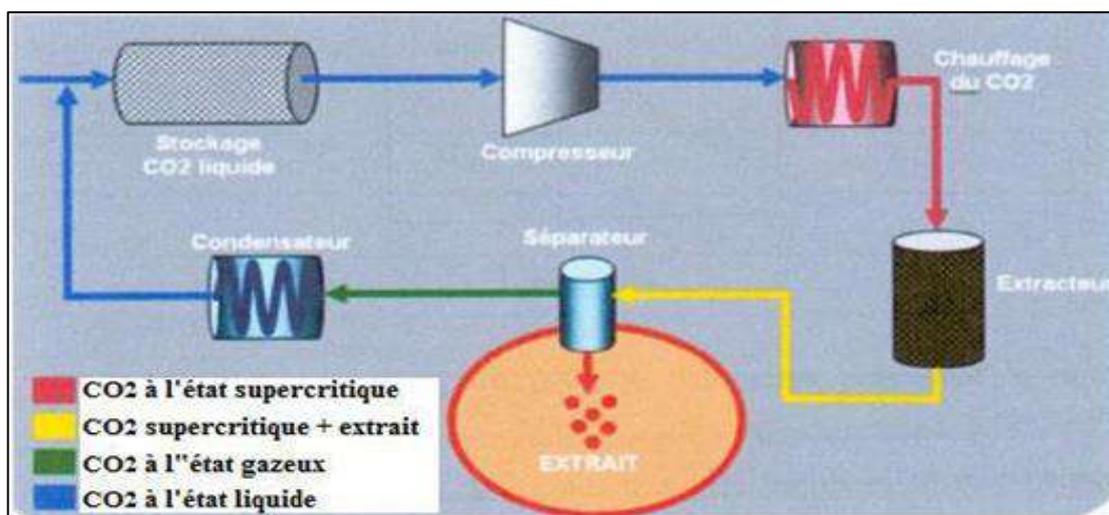


Figure 16: Schéma de la technique d'extraction par le CO2 supercritique

(Pourmortazavi et Hajimirsadeghi, 2007)

3. Conservation des huiles essentielles

Les huiles essentielles se conservent plusieurs années. Elles ont même tendance à se bonifier avec le temps (à l'exception des huiles essentielles extraites des zestes d'agrumes qui ne se conservent pas plus de 2 ans) (Longevialle, 1981).

Il est recommandé de les stocker dans des flacons en verre ambre ou foncé, de manière à les protéger de la lumière, il faut éviter les forts écarts de température et le contact avec l'air, il faut bien refermer les flacons après usage car les arômes s'évaporent dans l'atmosphère. Tenir les flacons hors de portée des enfants. Les flacons doivent être stockés en position verticale, en position horizontale, il y a un risque que le bouchon soit attaqué par l'huile (les huiles ont une action corrosive sur le plastique). Dans ces conditions, les huiles essentielles se conservent plusieurs années (Longevialle, 1981).

4. Caractérisations des huiles essentielles

L'importance des huiles essentielles dans divers domaines (pharmacie, cosmétique, parfumerie...) nous amène à vérifier leur qualité. La caractérisation d'une huile consiste à :

- Vérifier ses caractéristiques organoleptiques (Aspect, couleur, odeur) ;
- Déterminer ses indices physico-chimiques (densité, indice de réfraction, et indice d'acide) ;
- Obtenir son profil chromatographique et une quantification relative des différents constituants.

III. Extraction d'huile végétale

La plupart des huiles végétales sont issues de fruits d'oléagineux ou de graines. Afin de produire la « substantifique huile », ces dernières subissent une préparation : les feuilles et les tiges sont retirées, les graines sont décortiquées et parfois chauffées légèrement afin de fluidifier l'huile et en augmenter le rendement. Ils existent quatre modes essentiels d'extraction (Msika philipe.,2010)

1. Par presse hydraulique

Les fruits secs sont pressés à froid afin d'offrir une huile végétale vierge d'une excellente qualité. Les huiles ainsi produites sont étiquetées « première pression à froid » : un choix à privilégier pour garantir une alimentation saine et un procédé respectueux de la nature.

2. Par presse mécanique

Les graines sont triturées et légèrement échauffées. On obtient une huile pure dénuée de toute substance étrangère et ayant conservé les qualités diététiques de la graine. C'est la méthode la plus couramment employée.

3. Par centrifugation (pour les fruits oléagineux)

Il s'agit de séparer l'huile de la pulpe du fruit (amandes, noisettes, noix...) par force centrifuge.

4. Par extraction au solvant

L'hexane (solvant issu du pétrole) est destiné à dégraisser le résidu des graines broyées. Puis la distillation vise à éliminer le solvant afin d'obtenir l'huile. Si cette méthode s'avère la plus rentable (car elle permet de récolter une quantité bien supérieure d'huile), elle est néanmoins la moins saine puisqu'il est très probable que des résidus de solvants se retrouvent dans l'huile ainsi obtenue.

L'huile de graines de quinoa peut être extraite par plusieurs procédés (figure 16) (Msika philipe.,2010) :

- ✓ Extraction physique telle que la pression à froid sur presse mécanique, la pression sur extrudeuse bi-vis ;
- ✓ Extraction chimique à l'aide de solvants organiques (alcane aliphatiques, alcools, solvants chlorés, solvants fluorés) ;
- ✓ Extraction en milieu supercritique, à l'aide du dioxyde de carbone seul et/ou avec des co-solvants.

Avant extraction de l'huile, les saponines, contenues majoritairement sur la paroi externe des graines, sont avantageusement préalablement éliminées par décorticage abrasif ou par lavage à l'eau. Par ailleurs, les graines peuvent préalablement être traitées hydro-thermiquement (Msika philipe.,2010).

Pour l'extraction d'huile brute de Quinoa, l'utilisation d'un solvant chimique de type alcane aliphatique tel que le n-hexane sera préférée. Selon un mode d'extraction particulier, les graines, décortiquées et lavées, éventuellement prétraitées hydro-thermiquement, sont aplaties, afin d'obtenir des flocons, avant d'être introduites dans un extracteur continu à bande, et les lipides sont extraits par percolation de n-hexane. Le miscella recueilli est évaporé sous vide afin de récupérer l'huile désolvantée (Msika philipe.,2010).

Cette huile est alimentaire. A ce titre, elle peut être consommée par l'homme. Elle respecte donc les normes CODEX. Elle ne contient pas ou très peu d'acides gras libres. D'après les normes en vigueur, les valeurs maximales d'indice d'acide sont de 0,4 mg KOH/g d'huile, pour les huiles obtenues par pression à froid et les huiles vierges. Elle ne contient pas de sous-produits d'oxydation ou de produits résiduels du type résidus phytosanitaires et HAPs (hydrocarbures aromatiques polycyclique) (Msika philipe.,2010).

L'huile brute de Quinoa peut être raffinée selon des procédés connus de l'homme de métier tels que le raffinage physique (dégommage à l'eau, désacidification par désodorisation à haute température) et le raffinage chimique (démucilagination à l'eau ou traitement acide afin d'éliminer les phospholipides, neutralisation des acides gras libres à l'aide d'une solution basique, décoloration, frigélisation et désodorisation). Le raffinage chimique sera préféré car il permet d'éliminer les saponines entraînées lors de l'extraction, ainsi que la forte proportion de phospholipides et d'acides gras libres (Msika philipe.,2010).

IV. Extraction des composés peptidiques et osidiques

L'extrait peptidique et osidique est avantageusement obtenu par un procédé comprenant les étapes successives suivantes (figure 16) :

1. À partir de graines de quinoa, extraction d'une huile brute et d'un tourteau et récupération du tourteau ;
2. Lavage du tourteau par l'eau ou un mélange hydroalcoolique pour ne conserver que la partie protéique, puis solubilisation des protéines ;
3. Concentration des protéines puis hydrolyse des protéines en peptides ou des glucides ;
4. Purification et récupération de l'extrait peptidique ou glucidique.

L'extrait peptidique et osidique selon ce procédé présente avantageusement les spécifications suivantes par rapport au poids total de l'extrait peptidique : Teneur en peptides 25 – 90 (%) ; Teneur en sucres totaux 10 – 50 (%) (Miska.,02010)

Les différents extraits de quinoa peuvent entrer soit dans une composition alimentaire soit dans un complément alimentaire. Le complément alimentaire peut se présenter sous forme de l'extrait de quinoa en tant que tel (par exemple huile raffinée éventuellement enrichie en sa fraction insaponifiable) ou bien sous forme de gélules ou de capsules molles. Le complément alimentaire peut alors contenir de 10 à 100% en poids de l'extrait de quinoa (Msika philipe.,2010).

On peut incorporer les extraits de quinoa dans la nourriture, les boissons et les nutraceutiques, y compris dans ceux cités ci-dessous (Miska. 2010) :

- Les produits laitiers : tels que les fromages, le beurre, le lait et autres breuvages lactés, mélanges et pâtes à tartiner à base de produits lactés, crèmes glacées et yaourts ;
- Les produits à base de graisse tels que les margarines, pâtes à tartiner, mayonnaises, matières grasses pour cuisson, huiles à frire et vinaigrettes ;
- Les produits à base de céréales composés de graines tels que le pain et les pâtes, que ces aliments soient cuisinés, cuits au four ou transformés.
- Les confiseries tels que le chocolat, les bonbons, les chewing gums, les desserts, les nappages, les sorbets, les glaçages, et autres garnitures ;
- Les boissons alcoolisées ou non, y compris les sodas et autres boissons non alcoolisées, jus de fruits, compléments diététiques, substituts de repas sous forme de breuvage ;
- Les produits divers comme les œufs, les aliments transformés comme les soupes, les sauces toute prête pour pâtes, des plats préparés et autres produits du même genre.

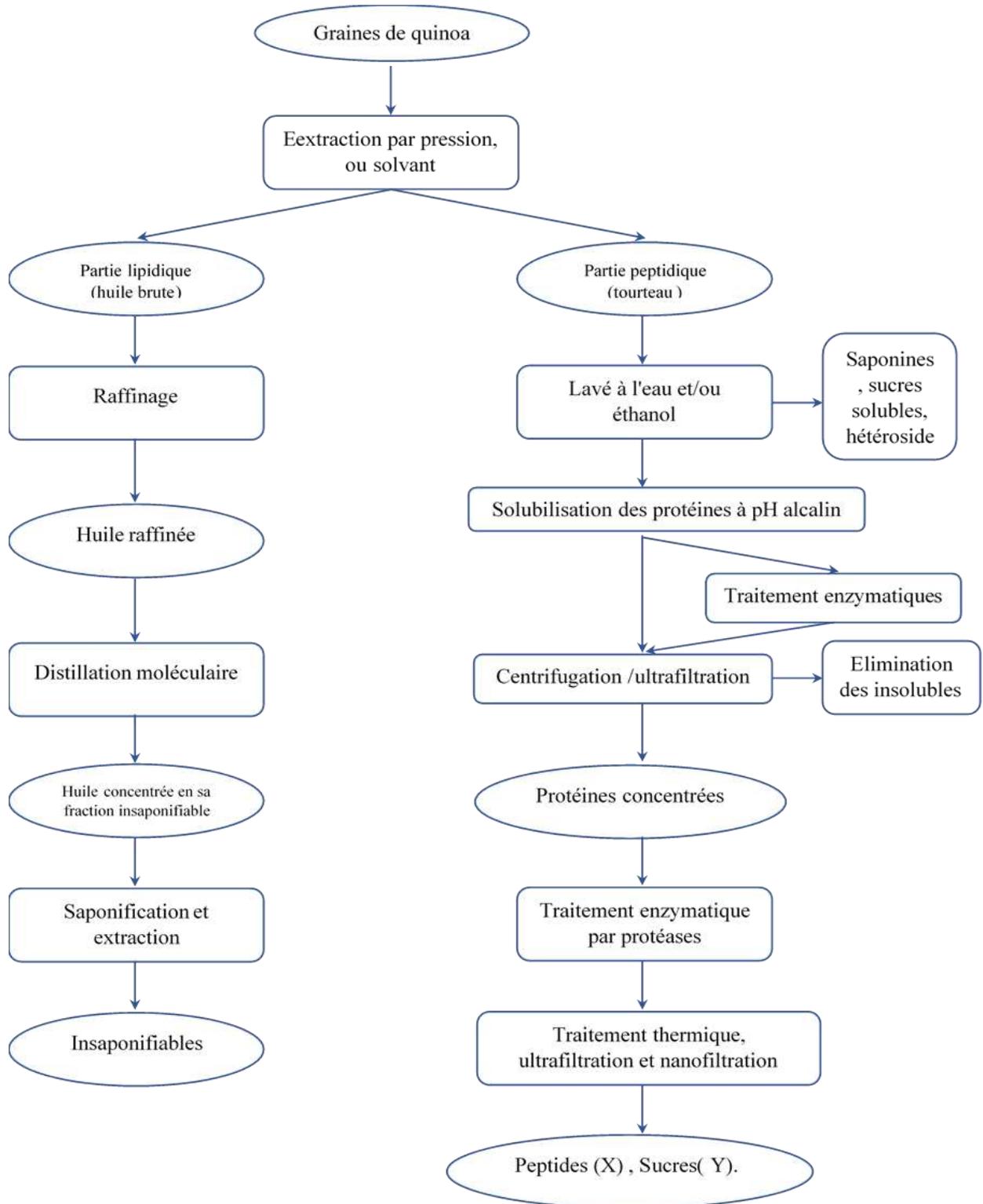


Figure 17 schéma récapitulatif des deux procédés d'extraction d'huile végétale et des composés peptidiques et osidique du quinoa (Msika., 2010)

CHAPITRE II

COMPOSITION CHIMIQUE

ET

VALEURS NUTRITIONNELLES

Les graines de quinoa constituent l'aliment de base des peuples andins d'Amérique du Sud depuis plusieurs milliers d'années. Il y a une quarantaine d'années, l'Europe a redécouvert cette culture et ses propriétés nutritionnelles remarquables. Le quinoa est souvent confondu avec les céréales comme le blé, le riz ou le maïs (monocotylédones de la famille des *Poaceae*), de sorte qu'il est considéré aujourd'hui comme une « pseudocéréale ». Cependant, en tant que membre de la famille des *Amaranthaceae*, le quinoa produit des graines dicotylédones qui se distinguent morphologiquement des grains de céréales (Alvarez-Jubete et al., 2010a).

Les pseudocéréales sont des plantes dont les graines ont la particularité de ressembler à celles des céréales, de par leurs fonctions et leur composition. Ce groupe comprend trois cultures : l'amarante (*Amaranthus spp.*, *Amaranthaceae*), le quinoa (*Chenopodium quinoa*, *Amaranthaceae* – anciennement *Chenopodiaceae*) et le sarrasin (*Fagopyrum esculentum*, *Polygonaceae*) (Alvarez-Jubete et al., 2010a).

Ces dernières années, la valeur nutritionnelle de ces pseudocéréales est mise en avant, et particulièrement celle des graines de quinoa. Les études quantitatives et qualitatives portent non seulement sur la composition et la qualité des nutriments essentiels, mais aussi sur les composés chimiques bioactifs. Cependant, les résultats diffèrent parfois de façon importante et cette variabilité est la conséquence de la grande diversité des échantillons utilisés et de l'évolution des techniques d'analyse, toujours plus spécifiques (Alvarez-Jubete et al., 2010a).

I. Composition chimique des graines de quinoa

1. Les Protéines

1.1 Les protéines de stockage

Les protéines de stockage peuvent être définies comme des protéines dont la principale fonction est de fournir les éléments nécessaires au développement des jeunes plants (Shewry, 2002). Elles sont déposées dans des corps protéiques consistant en une matrice protéique contenant un ou plusieurs cristaux globulaires, ceux-ci renfermant du phosphore, du potassium et du magnésium ; et sont localisés dans l'endosperme et l'embryon de la graine de quinoa (Prego et al., 1998).

La grande majorité des protéines de stockage se répartissent en quatre grands groupes :

- Les Globulines, subdivisées en deux classes distinctes sur la base de leurs coefficients de sédimentation
 - Les globulines 11S
 - Les globulines 7S
- Les Albumines,
- Et les Prolamines.

Les principales fractions de protéines du quinoa (et des autres pseudocéréales) sont les globulines et les albumines (Fairbanks et al., 1989). Ces protéines ont été spécifiquement caractérisées et sont principalement de type 11S et 2S, comme dans les autres espèces dicotylédones (Brinegar et Goundan, 1993).

La globuline de type 11S, prédominante (37% des protéines totales), a été appelée « chenopodin » conformément à la tradition d'attribuer des noms triviaux dérivés du genre de la plante (par exemple la globuline 11S du soja, *Glycine max*, est appelée « glycinine »). L'autre protéine majoritaire (35% des protéines totales) est de type 2S, également connue sous le nom d'albumine (Osborne, 1924).

Par ailleurs, les protéines du quinoa ne contiennent pas, ou très peu, de prolamines qui sont les principales protéines de réserve des céréales conventionnelles. Ces prolamines, telles que la gliadine du blé ou l'hordénine de l'orge, sont collectivement appelées « gluten » et induisent des réponses auto-immunes chez les patients cœliaques (Zevallos *et al.*, 2012 ; Biesiekierski *et al.*, 2013).

L'avantage unique des graines du quinoa est qu'elles présentent une haute teneur en protéines totales, variant entre 12 et 24% selon les sources (Koziol, 1992 ; Ando *et al.*, 2002 ; Wright *et al.*, 2002 ; Gallego Villa *et al.*, 2014 ; Mota *et al.*, 2014 ; González Martín *et al.*, 2014 ; Ferreira *et al.*, 2015). La concentration protéique moyenne du quinoa s'avère supérieure à celle des céréales communes telles que le riz (*Oriza sativa*, *Poaceae*) (7,9%), l'orge (*Hordeum vulgare*, *Poaceae*) (12,5%) ou le maïs (*Zea mays*, *Poaceae*) (9,4%) et comparable à celle du blé (*Triticum spp.*) (13,7%). A l'inverse, cette teneur est plus faible que celle des graines de certaines légumineuses comme les haricots (*Phaseolus vulgaris*, *Fabaceae*) (23,6%) (USDA, 2015).

Les protéines du quinoa révèlent une importante valeur nutritionnelle, qui se détermine avant tout par la balance en acides aminés essentiels (FAO, 2011) (Tableau 3), c'est-à-dire ceux que le corps ne peut synthétiser lui-même et nécessitant donc d'être fournis par le régime alimentaire.

Selon les recommandations de la FAO/WHO, la protéine de quinoa peut livrer plus de 180% des apports quotidiens recommandés en acides aminés essentiels pour la nutrition des adultes avec des proportions adéquats pour tous les 10 acides aminés essentiels (Wright *et al.*, 2002 ; Abugoch James, 2009 ; Vega-Galvez *et al.*, 2010). Les différents teneurs en acides aminés répondent également aux exigences recommandées pour les enfants d'âge préscolaire et les enfants scolarisés (FAO/WHO/ONU, 1985).

Tableau 3 : Comparaison de la composition en acides aminés et de la teneur en protéines de la graine de quinoa avec d'autres céréales et légumineuses (mg/100g). (1) USDA, 2005 / (2) USDA, 2015, FAO 2011 in Herbillon Marie., 2015)

	Quinoa ⁽¹⁾	Blé ⁽²⁾	Orge ⁽²⁾	Riz ⁽²⁾	Maïs ⁽²⁾	Haricot ⁽²⁾
Histidine	407	322	281	202	287	656
Isoleucine	504	533	456	336	337	1041
Leucine	840	934	848	657	1155	1882
Lysine	766	303	465	303	265	1618
Méthionine	309	221	240	179	197	355
Phénylalanine	593	681	700	410	463	1275
Thréonine	421	366	424	291	354	992
Tryptophane	167	176	208	101	67	279
Valine	594	594	612	466	477	1233
Arginine	1091	483	625	602	470	1460
Cystine	203	286	276	96	170	256
Glycine	694	495	452	391	386	920
Proline	773	1459	1484	372	822	1000
Tyrosine	267	357	358	198	383	664
Protéines (g/100g de graines)						
	14,1	13,7	12,5	7,9	9,4	23,6

1.2 Inhibiteurs de protéase

Les inhibiteurs de protéase sont des protéines qui forment des complexes très stables avec des enzymes protéolytiques. Ces composés sont largement répandus dans la nature, en particulier dans de nombreux aliments d'origine végétale (Aguirre et *al.*, 2004).

Les plus connus sont les inhibiteurs de trypsine dont il a été rapporté de très faibles quantités dans le quinoa, allant de 1,36 à 5,04 TIU/mg (TIU = Unité Inhibant la Trypsine) (Romero, 1981). Une autre étude plus tardive n'a retrouvé aucune activité anti-protéasique dans le quinoa, tout du moins s'il y en avait, leur présence ne permettait pas de dépasser la limite de détection du procédé utilisé, soit 50 ppm ou 0,97 TIU/100g (Kakade et *al.*, 1969 ; Ruales et Nair, 1993b).

1.3 Lectines

Les lectines sont des protéines, ou glycoprotéines, d'origine non immunitaire présentes dans toutes les branches du règne vivant, autant chez les virus, les bactéries, les insectes et les animaux que chez les plantes. Elles peuvent se lier de façon spécifique et réversible aux hydrates de carbone et ne montrent aucune activité enzymatique pour leurs substrats (Lis et Sharon, 1998). Elles ont également été appelées hémagglutinines à cause de leur interaction avec les glucides présents à la surface des globules rouges, entraînant ainsi l'agglutination de ces cellules, autant chez l'homme que chez l'animal (Grant et *al.*, 1995).

Une très faible activité de la part des lectines a été rapportée dans les graines du quinoa, de l'ordre de $5,2 \cdot 10^{-8}$ HU/kg de farine (HU = Unités provoquant l'hémagglutination) (Grant et *al.*, 1995).

2. Les Glucides

Les glucides sont les composants majeurs retrouvés dans les graines du quinoa, leur teneur variant entre 67% et 74% de la matière sèche. On trouve majoritairement de l'amidon, mais aussi des fibres alimentaires (solubles et insolubles) et des sucres simples (Jancurová et *al.*, 2009).

2.1 L'amidon

Dans l'ensemble du règne végétal, l'amidon est l'hydrate de carbone le plus important. Dans les graines de quinoa, sa concentration varie entre 50 et 60%, une teneur légèrement inférieure à celle retrouvée dans les autres céréales comme le blé (64-70%) ou le maïs (73%) (Ando et *al.*, 2002).

L'amidon du quinoa est stocké principalement dans les cellules du périsperme de la graine, avec de petites quantités apparaissant dans le tégument et l'embryon (Prego et *al.*, 1998). Il est présent à la fois en tant que petits granules individuels et que gros agrégats composés de centaines de granules. Les granules individuels sont polygonaux avec un diamètre d'environ 1 μm de diamètre (entre 0,08 et 2,0 μm), une taille de particule très inférieure à celle de l'amidon des céréales comme le riz (0,5–3,9 μm), le blé (0,7–39,2 μm), l'orge (1,0–39,2 μm) et le maïs (1,0–7,7 μm) (Tang et *al.*, 1998). Quant aux granules composés, ils sont de forme oblongue ou sphéroïdale avec un diamètre variant entre 20 et 30 μm (Ando et *al.*, 2002).

L'amidon est un mélange de deux polymères : l'amylose soluble dans l'eau à 80°C avec laquelle il forme un gel et l'amylopectine, le plus abondant et insoluble dans l'eau (Guignard et Potier, 2004). Il a été rapporté une variabilité considérable de la teneur en amylose de l'amidon de quinoa, avec une moyenne globale de 11% ; soit plus faible que dans les céréales communes telles que le riz (17%), le blé (22%) ou l'orge (26%) (Valencia-Chamorro, 2003 ; Steffolani et *al.*, 2013). En contrepartie, l'amidon du quinoa est très riche en amylopectine qui lui confère une excellente stabilité aux processus de congélation-décongélation (Berghofer et Schoenlechner, 2002).

Le pourcentage d'amylose est important car, tout comme la taille des granules, il affecte de manière significative les caractéristiques fonctionnelles de l'amidon et va influencer les propriétés physico-chimiques de la farine comme sa solubilité, sa viscosité ou sa capacité à absorber l'eau. L'amidon du quinoa gélatinise ainsi à des températures relativement basses (57-71°C), présente une viscosité élevée, une grande capacité de rétention d'eau et un pouvoir de gonflement important. Il a également montré une sensibilité enzymatique élevée et une excellente stabilité dans les processus de congélation et de rétrogradation (Ando et *al.*, 2002 ; Schoenlechner et *al.*, 2008).

De plus, il s'est révélé être un meilleur agent épaississant que d'autres amidons. Cependant, les pains et les gâteaux cuits avec de l'amidon de quinoa sont de mauvaise qualité.

Du fait de ces propriétés physico-chimiques et fonctionnelles, l'amidon du quinoa peut être utilisé dans l'industrie alimentaire ou dans des applications non-alimentaires telles que les industries pharmaceutiques ou de textile. Des programmes de sélection pourraient même permettre de développer des variétés de quinoa avec des caractéristiques particulières de l'amidon (Steffolani et *al.*, 2013).

La haute teneur en amidon des glucides du quinoa en fait une source d'énergie idéale qui, grâce à leur teneur élevée en fibres, est libérée lentement dans le corps. Cette caractéristique permet de qualifier le quinoa d'aliment à index glycémique bas. En plus d'une fonction nutritionnelle de base, les glucides peuvent avoir différents effets physiologiques sur la santé, tels que des effets sur la satiété

et la vidange gastrique, le contrôle de la glycémie et du métabolisme de l'insuline, la glycosylation des protéines ou encore le métabolisme du cholestérol et des triglycérides (FAO, 1998).

2.2 Les fibres alimentaires

Les fibres alimentaires constituent un ensemble de substances complexes d'origine végétale qui échappent à l'action des enzymes digestives et à l'absorption intestinale. Elles parviennent directement dans le gros intestin et peuvent subir une fermentation totale ou partielle par les bactéries du côlon. Si elles n'ont pas de valeur nutritionnelle apparente, elles sont toutefois indispensables au bon fonctionnement du transit intestinal (Brownawell *et al.*, 2012 ; Graf *et al.*, 2015).

Ce sont des polymères complexes, de grande taille, qui ont commun leur nature polysaccharidique (à l'exception de la lignine). Ces substances résiduelles sont aujourd'hui reconnues pour leurs nombreux effets bénéfiques sur la santé humaine (Brownawell *et al.*, 2012 ; Graf *et al.*, 2015).

Les fibres alimentaires sont de deux sortes :

- Les fibres solubles comme les pectines, les gommes ou les mucilages qui forment des solutions visqueuses ou des gels au contact de l'eau ;
- Les fibres insolubles dans l'eau telles que la cellulose ou la lignine.

Composées d'environ 80% de fibres insolubles et de 20% de fibres solubles, les fibres alimentaires du quinoa sont représentées essentiellement par des xyloglucanes et des polysaccharides pectiques, en des quantités et des structures variables en fonction de la fraction de fibres. Les fibres insolubles se composent principalement d'acide galacturonique, de glucose, d'arabinose, de xylose et de galactose ; tandis que les fibres solubles contiennent surtout du glucose, de l'acide galacturonique et de l'arabinose (Lamothe *et al.*, 2015).

2.3 Sucres simples

Les graines de quinoa contiennent environ 3% de sucres individuels, avec essentiellement du maltose, suivi par le D-galactose et le D-ribose ; ainsi que de faibles niveaux de fructose et de glucose (Ranhotra *et al.*, 1993 ; Oshodi *et al.*, 1999).

3. Les Lipides et composés lipidiques

La teneur en lipides de la graine de quinoa, en moyenne de 6%, connaît des variations en fonction des cultivars ou des méthodes de quantification utilisées (González Martín *et al.*, 2014 ; Ferreira *et al.*, 2015). Cette quantité en matière grasse de la graine, bien que beaucoup plus basse que celle du soja (39,6%), est entre deux et trois fois plus élevée que dans d'autres céréales telles que le maïs (4,7%) ou le blé (2,5%) (USDA, 2015), et en fait une source potentielle pour l'extraction d'huile (Repo-Carrasco *et al.*, 2003).

Les lipides sont localisés dans des corps lipidiques qui sont les éléments de stockage des cellules de l'endosperme et des tissus embryonnaires de la graine de quinoa (Prego *et al.*, 1998). Les différentes fractions lipidiques isolées à partir de la graine de quinoa ont été décomposées en trois catégories : lipides neutres, polaires et acides gras libres (Przybylski *et al.*, 1994) (Tableau 4).

L'huile de quinoa a été signalée comme étant généralement stable contre l'oxydation, ce en dépit d'une haute teneur en matières grasses et du degré d'insaturation important. Cette propriété a été attribuée à la présence naturelle de tocophérols (vitamine E) dans la fraction lipidique qui agissent comme un antioxydant naturel en captant les radicaux libres et augmentent ainsi la stabilité de l'huile (Koziol, 1992 ; Schoenlechner et *al.*, 2008).

Les graisses sont tout d'abord des fournisseurs d'énergie, mais elles offrent également des composants jouant bien d'autres rôles, les acides gras, dont les bienfaits potentiels de certains sur la santé sont de plus en plus reconnus.

Tableau 4 : Composition lipidique dans la graine de quinoa (en %). (Koziol, 1992 ; Schoenlechner et *al.*, 2008 in Herbillon Marie., 2015

	Graine entière	Coque	Son	Farine
Lipides neutres	55,9	40,2	76,2	69,5
- Triglycérides	73,7	71,7	82,1	87,2
- Diglycérides	20,5	22	13	10
- Monoglycérides	3,1	4,7	1,8	1,6
- Cires	2,7	2,2	3,2	1,1
Lipides polaires	25,2	44,4	12,7	21,1
-Lysophosphatidyl éthanolamine	43,2	43,3	22,3	16,6
- Phosphatidyl éthanolamine	18,5	19,8	13,4	8,3
- Phosphatidyl choline	12,3	15,6	48,3	49
- Phosphatidyl inositol	10,5	9,6	5,8	12,8
- Phosphatidyl sérine	4	3,1	3,9	2,7
- Lysophosphatidyl choline	3,6	2,9	4,2	3,4
- Autres	3,2	2,6	0,4	0,2
- Digalactosyl diglycéride	2,8	1,9	0,9	3,9
- Monogalactosyl diglycéride	1,6	1,2	0,4	2,7
- Acide phosphatidique	1,1	0,6	0,5	0,4
Acides gras libres	18,9	15,4	11,1	9,4

La composition en acides gras des lipides du quinoa a été caractérisée comme suit (Tableau 5)

- Les acides gras saturés (14%), avec principalement de l'acide palmitique (9,7 – 11%) ;
- Les acides gras monoinsaturés (28,1%), représentés surtout par l'acide oléique (24,5 – 26,7%);
- Les acides gras polyinsaturés (57,5%), avec l'acide linoléique largement majoritaire (48,2 – 56%).

Tableau 5: Comparaison de la composition en acides gras de la fraction lipidique des graines de quinoa, du blé et du maïs (g/100g)

Acides gras	Symbole	Quinoa ⁽¹⁾	Blé ⁽²⁾	Maïs ⁽³⁾
Saturés		14	27,3	15,4
- Acide myristique	C14:0	0,1	-	-
- Acide palmitique	C16:0	9,7 – 11,0	23,7	12,5
- Acide stéarique	C18:0	0,6 – 1,1	2,8	1,9
- Acide arachidique	C20:0	0,4– 0,7	0,3	0,57
- Acide béhénique	C22:0	0,5– 0,7	0,2	0,2
- Acide tétracosanoïque	C24:0	0,2– 0,4	-	-
Monoinsaturés		28,1	13,4	30,0
- Acide palmitoléique	C16:1	0,1 ⁽⁴⁾ – 0,2 ⁽⁵⁾	-	0,2
- Acide oléique	C18:1	24,5– 26,7	13,2	29,2
- Acide eicosénoïque	C20:1	1,4	-	0,5
- Acide 9-docosénoïque	C22:1	1,2– 1,5	-	-
- Acide tétracosanoïque	C24:1	2,4– 2,6	-	-
Polyinsaturés		57,5	59,4	54,6
- Acide linoléique	C18:2	48,2– 56,0	55,1	53
- Acide α -linoléique	C18:3	3,8– 8,3	3,8	1,6
- Acide eicosadiénoïque	C20:2	0,1– 1,4	0,5	-

(1) Valcárcel-Yamani et da Silva Lannes, 2012

(3) Ryan et al., 2007

(5) Ruales et Nair, 1993a

(2) Alvarez-Jubete et al., 2009

(4) Koziol, 1992

in Herbillon Marie., 2015

4. Les Minéraux

Les graines de quinoa sont très riches en micronutriments tels que les minéraux, avec une teneur de 2,3%, soit plus élevée que dans la plupart des céréales comme le blé (1,78%), le riz (1,53%), le maïs (1,20%), et comparable à l'orge (2,29%) (USDA, 2015). La teneur minérale totale (cendres) du quinoa est fortement influencée par les conditions environnementales durant la croissance des graines, et en particulier par la disponibilité des minéraux du sol (Alvarez-Jubete, 2009).

Malgré ces variations parfois importantes, les diverses analyses de la composition minérale des graines de quinoa s'accordent à dire qu'elles sont riches en potassium, en calcium, en magnésium, en phosphore et en fer. On trouve également du zinc, du manganèse, du cuivre et du sodium en petites quantités (González-Martín et al., 2014 ; Palombini et al., 2013 ; Konishi et al., 2004 ; Ando et al., 2002).

Tableau 6 : Comparaison de la teneur moyenne en minéraux du quinoa avec d'autres céréales (mg/100g) (1 – 2 in Herbillon Marie., 2015)

Minéraux	Quinoa ⁽¹⁾	Blé ⁽²⁾	Riz ⁽²⁾	Maïs ⁽²⁾	Orge ⁽²⁾
Calcium (Ca)	110,93	34	23	7	33
Fer (Fe)	16,77	3,52	1,47	2,71	3,6
Magnésium (Mg)	343,80	144	143	127	133
Zinc (Zn)	2,60	4,16	2,02	2,21	2,77
Manganèse (Mn)	3,55	3,012	3,743	0,485	1,943
Potassium (K)	833,85	431	223	287	452
Cuivre (Cu)	2,90	0,553	0,277	0,314	0,498
Sodium (Na)	4,30	2	7	35	12
Phosphore (P)	228,43	508	333	210	264

(1) Teneur moyenne obtenue à partir des données de : González Martin *et al.*, 2014 ; Palombini *et al.*, 2013 ; Konishi *et al.*, 2004 ; Ando *et al.*, 2002 ; Koziol, 1992.

(2) USDA, 2015

5. Vitamines

Les graines de quinoa présentent des quantités significatives de vitamines, tout particulièrement en thiamine, riboflavine, vitamine B6 et folates. Les niveaux de riboflavine et de folates sont plus élevés que dans les céréales conventionnelles telles que le blé, le riz, le maïs ou l'orge. A l'inverse, la teneur en niacine est nettement inférieure aux quantités retrouvées dans les céréales comparatives (Tableau 7).

On note également la présence de tocophérols et de tocotriénols, une classe de composés solubles dans les lipides des graines de quinoa et collectivement connus comme la vitamine E. Ce sont de puissants antioxydants qui protègent les acides gras insaturés de l'oxydation et permettent une stabilité prolongée de l'huile de quinoa (Ryan *et al.*, 2007). Les quatre isoformes de tocophérols ont été détectés dans les graines de quinoa, avec néanmoins des variations entre les différents cultivars. Les variétés de quinoa aux graines noires, par exemple, présentent globalement les concentrations les plus élevées (Tang *et al.*, 2015a).

La teneur totale en vitamine E du quinoa (50,8 µg/g) est similaire à celle de céréales comme le blé (49,4 µg/g), cependant la composition en tocophérols est différente. Dans les graines de quinoa, l'isoforme prédominant est le g-tocophérol pour tous les génotypes étudiés, au lieu de l'a-tocophérol dans le blé. De plus, le blé présente généralement d'avantage de tocotriénols que de tocophérols (en particulier dans les formes cultivées), tandis qu'on ne les retrouve qu'à l'état de traces dans le quinoa (Lampi *et al.*, 2008).

Tableau 7 : Comparaison de la teneur en vitamines de la graine de quinoa avec d'autres céréales ($\mu\text{g/g}$)

Vitamines	Quinoa ⁽¹⁾	Blé ⁽²⁾	Riz ⁽²⁾	Maïs ⁽²⁾	Orge ⁽²⁾
Thiamine (B1)	3,6	4,19	4,01	3,85	6,46
Riboflavine (B2)	3,1	1,21	0,93	2,01	2,85
Niacine (B3)	15,2	67,38	50,91	36,27	46,04
Vitamine B6	48,7	4,19	5,09	6,22	3,18
Folate total	18,4	0,43	0,2	0,19	0,19
Vitamine E (Total)	50,8 ⁽³⁾	49,4 ⁽⁴⁾	-	-	-
Tocophérols					
a-tocophérol	8,78 ⁽³⁾	-	5,9	4,9	5,7
b-tocophérol	0,64 ⁽³⁾	-	-	-	-
g-tocophérol	38,8 ⁽³⁾	-	-	-	-
δ -tocophérol	1,73 ⁽³⁾	-	-	-	-
Tocotriénols					
a-tocotriénol	0,51 ⁽³⁾	-	-	-	-
b-tocotriénol	0,82 ⁽³⁾	-	-	-	-

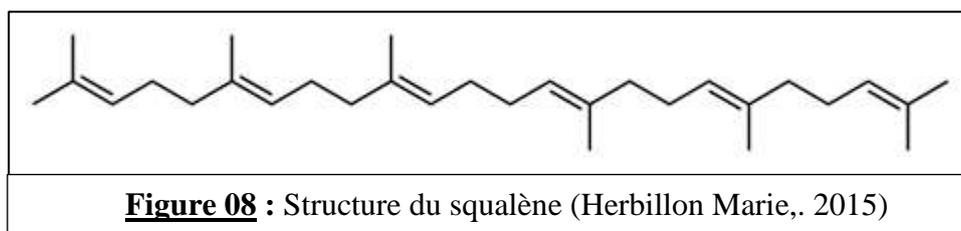
In Herbillon Marie., 2015 { (1) USDA, 2005
 (2) USDA, 2015
 (3) Moyenne des valeurs obtenues pour trois génotypes typiques de quinoa (blanc, rouge et noir) (Tang *et al.*, 2015a)
 (4) Moyenne des valeurs obtenues pour 175 génotypes de blé (Lampi *et al.*, 2008)

6. Terpènes et Stéroïdes

6.1 Squalène et phytostérols

Le squalène et les phytostérols sont des composés présents dans la fraction lipidique insaponifiable de l'huile de quinoa (comme les tocophérols), une fraction résiduelle qui est insoluble dans l'eau après saponification (Ryan *et al.*, 2007).

Le squalène, un isoprénoïde de 30C (Figure 17), est un des précurseurs dans la biosynthèse des stéroïdes et un intermédiaire clé dans celle du cholestérol. Environ 60 mg/100g de squalène ont été trouvés dans la fraction lipidique du quinoa, une teneur très supérieure à celle des céréales comme l'orge (0,2 mg/100g), le maïs (1,6 mg/100g) ou le seigle (0,3 mg/100g), et des légumineuses telles que les haricots et les lentilles (0,7 mg/100g) (Ryan *et al.*, 2007) (tableau 8).



Quant aux phytostérols (stérols végétaux), ce sont des composés triterpéniques constituant la base structurale des membranes végétales. Ils servent à stabiliser les bicouches de phospholipides des membranes cellulaires végétales, au même titre que le cholestérol dans le cas des membranes

cellulaires animales. Ils sont particulièrement abondants dans les huiles végétales, les noix, les graines et les céréales (Weihrach et Gardner, 1978 ; Moreau *et al.*, 2002).

Les phytostérols représentés dans les graines de quinoa sont le ***b*-sitostérol**, largement majoritaire, le campestérol et le stigmastérol, qui sont les stérols végétaux les plus abondants (tableau 8). Les niveaux retrouvés dans le quinoa sont plus élevés que dans l'orge et le maïs, comparables à ceux déterminés dans le seigle. A l'inverse, les valeurs sont nettement inférieures à celles des légumineuses, en particulier concernant le *b*-sitostérol et le stigmastérol (Ryan *et al.*, 2007).

Tableau 8: Teneur en squalène et phytostérols dans les graines de quinoa et comparaison avec d'autres céréales et légumineuses (mg/100g) (Ryan *et al.*, 2007 in Herbillon Marie., 2015).

	Squalène	Phytostérols			
		<i>b</i> -sitostérol	Campestérol	Stigmastérol	Total
Quinoa	58,4	63,7	15,6	3,2	82,5
Orge	0,2	38,1	12	0,3	50,4
Maïs	1,6	34,1	9,1	0,4	43,6
Seigle	0,3	58,4	16,8	0,7	75,9
Haricots	0,7	86,5	6,5	41,4	134,4
Lentilles	0,7	123,4	15	20	242,4

6.2 Les Saponines

Les saponines constituent un groupe de composés glycosidiques naturels largement distribués dans le règne végétal. Elles sont signalées dans près de 500 plantes qui représentent plus de 90 familles. On les trouve notamment dans des végétaux couramment utilisés dans l'alimentation humaine et animale comme le soja, les haricots, les lentilles, les pois, l'avoine, les betteraves à sucre, les pommes de terre, les tomates, les oignons, l'ail, les cacahuètes, les concombres, les asperges ou encore les épinards (Basu et Rastogi, 1967 ; Chandel et Rastogi, 1980 ; Price et Johnson, 1987).

Ces composés ont en commun la propriété d'être soluble dans l'eau et de former des solutions moussantes après agitation, ces propriétés tensio-actives les distinguant des autres glycosides (Agarwal et Rastogi, 1974 ; Tyler *et al.*, 1981). Leur nom provient d'une plante appelée saponaire (*Saponaria officinalis* L.) dont la racine a largement été utilisée depuis des siècles comme savon (sapo, onis = savon) (Sparg *et al.*, 2004). Les plantes contenant des saponines sont ainsi recherchées pour une utilisation dans les produits ménagers (Bruneton, 2009). Elles sont malheureusement responsables du goût amer caractéristique des graines de quinoa et sont considérées comme toxiques en grandes quantités. Avant consommation, les graines doivent donc subir un traitement d'élimination de l'enveloppe dans laquelle les saponines sont particulièrement concentrées.

Les saponines sont des glycosides constitués d'un aglycone sur lequel sont fixées une ou plusieurs chaînes de sucre. Ce sont des composés amphiphiles, l'aglycone constituant la partie lipophile tandis que les sucres représentent la partie hydrophile (Wink, 2004). Elles sont généralement classées en deux groupes distincts selon la structure chimique de leur squelette aglycone, également appelée sapogénine. Le premier groupe est constitué de saponines stéroïdiennes, présentes essentiellement chez les angiospermes monocotylédones. Le deuxième groupe est représenté par les

saponines triterpéniques. Ce sont les plus fréquentes et elles se produisent surtout dans les angiospermes dicotylédones (Sparg *et al.*, 2004).

Leur concentration dans les graines varie selon la variété : pour le quinoa, on parle de variétés « normales » ou « amères » pour les plus concentrées en saponines, et de variétés « douces » avec des teneurs en saponines environ 50 fois inférieure à la normale. Le contenu en saponogénines dans les graines des génotypes doux varie de 0,2 à 0,4 g/kg ; contre 4,7 à 11,3 g/kg pour les génotypes amers (Mastebroek *et al.*, 2000).

6.3 Composés Phénoliques

Les composés phénoliques, également appelés polyphénols, sont des métabolites secondaires bioactifs largement présents dans les aliments d'origine végétale couramment consommés.

Les trois principaux types de polyphénols sont les acides phénoliques, les flavonoïdes et les tannins, qui agissent comme de puissants antioxydants *in vitro*. Dans les aliments, ils peuvent contribuer à l'amertume, l'astringence, la couleur, la saveur et à la stabilité à l'oxydation. Grâce à leurs effets bénéfiques sur la santé, les études sur les polyphénols connaissent une importance croissante. En effet, ils interviennent dans la prévention et le traitement des maladies liées au stress oxydatif tel que les cancers, le diabète, les maladies inflammatoires, cardiovasculaires et neurodégénératives (Mastebroek *et al.*, 2000).

6.3.1 Acides phénoliques

On sait aujourd'hui que les composés phénoliques existent non seulement sous forme libre, mais aussi dans des formes conjuguées. Dans les graines de quinoa, la majorité des polyphénols extractibles sont d'ailleurs sous forme conjuguée. Pour cette raison, la quantification des acides phénoliques totaux nécessite un traitement préalable par hydrolyse acide ou alcaline afin de libérer les formes conjuguées (Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2010).

Les teneurs en acides phénoliques solubles (formes libres et liés) et totaux sont quantifiées comme aglycones, les principaux retrouvés dans les graines de quinoa étant représentés par l'acide vanillique 11 mg/100g et l'acide férulique 15 mg/100g (Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2010).

La teneur totale en acides phénoliques dans les graines de quinoa est de 37 mg/100g en moyenne (30,3 à 59,7 mg/100g selon les échantillons) ; avec un pourcentage moyen d'acides phénoliques solubles de 39% (entre 21 et 61%) (Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2010). Cette teneur en acides phénoliques est faible par rapport aux céréales courantes comme le son de blé (453 mg/100g) ou de seigle (419 mg/100g) mais est similaire aux niveaux trouvés dans l'avoine, l'orge, le maïs et le riz (entre 25 et 60 mg/100g) (Mattila *et al.*, 2005).

6.3.2 Flavonoïdes

Les flavonoïdes sont également analysés comme aglycones. La teneur globale dans les graines de quinoa est exceptionnellement élevée, variant de 36,2 à 72,6 mg/100g selon les échantillons, avec une moyenne globale de 58 mg/100g. Les aglycones prédominants et toujours présents sont la quercétine et le kaempférol ; alors que la myricétine et l'isorhamnétine n'ont pas été retrouvés dans toutes les variétés (Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2010).

6.3.3 Tanins

Les tanins sont des composés polyphénoliques qui ont la particularité de pouvoir précipiter des protéines à partir de solutions aqueuses (Makkar et *al.*, 1988). Ce sont des métabolites secondaires que l'on retrouve dans les plantes supérieures (Schoenlechner et *al.*, 2008).

Les quantités suivantes ont été déterminées : 0,53 g/100g dans les graines de quinoa entières, 0,28 g/100g dans le quinoa décortiqué manuellement et 0,23 g/100g après lavage des graines avec de l'eau; ce qui signifie qu'environ la moitié des tanins est contenue dans l'enveloppe des graines (Chauhan et *al.*, 1992).

7. Pigment

7.1 Caroténoïdes

Les caroténoïdes sont des pigments végétaux naturels qui ont un rôle essentiel dans le processus de photosynthèse. Ils sont responsables des couleurs orange à jaune et agissent également comme des antioxydants et des précurseurs d'hormones végétales. Ces composés liposolubles de la famille des terpénoïdes sont retrouvés dans de nombreux aliments végétaux, en particulier les fruits, les légumes et les grains comme la tomate, le blé et le maïs (Humphries et Khachik, 2003 ; Li et *al.*, 2012).

Les caroténoïdes jouent un rôle important dans la nutrition et la santé humaine, essentiellement parce que certains sont des précurseurs de la vitamine A. Plus de 700 caroténoïdes ont été identifiés dans les aliments végétaux, mais la grande majorité (environ 90%) apportée par l'alimentation humaine est représentée par le b-carotène, l'a-carotène, le lycopène, la lutéine, la zéaxanthine et la cryptoxanthine (Gerster, 1997 ; Li et *al.*, 2012).

La teneur totale en caroténoïdes dans les graines de quinoa est en moyenne de 14,8 µg/g, avec des variations selon les cultivars. Les deux caroténoïdes prédominants dans la graine de quinoa sont la lutéine et la zéaxanthine dans leurs formes *trans*, avec des teneurs moyennes de 9,45 µg/g et 0,47 µg/g, respectivement.

7.2 Bétacyanines

Les bétacyanines sont des pigments de la famille des bétalaines et responsables des couleurs rouge à violet. Une récente étude révèle que les pigments des graines rouges et noires de quinoa sont des bétacyanines, principalement la bétanine et l'isobétanine (Tang et *al.*, 2015b), dont les teneurs dépendent naturellement de la couleur de la graine. Une découverte étonnante sachant que l'on pensait, jusqu'à présent, que les graines de quinoa contenaient plutôt des anthocyanines, une autre famille de pigments donnant une coloration bleu sombre-violette caractéristique des fruits rouges (Pasko et *al.*, 2009).

II. Valeurs nutritionnelles des graines du quinoa

Pour certains, le quinoa est un aliment nouveau et nutritif qu'on trouve depuis peu dans les supermarchés et les restaurants et qui peut remplacer de nombreuses céréales de consommation courante. Certes, dans de nombreuses régions du monde, cette vision correspond à la réalité mais il faut savoir que le quinoa était l'une des principales cultures vivrières des civilisations précolombiennes d'Amérique latine et demeure un aliment important pour les Quechuas et les

Aymaras installés dans les zones rurales des Andes, en Amérique du Sud. Dans la langue quechua, le quinoa est appelé *chisiya*, ce qui signifie céréale mère (Abugoch James., 2009).

La particularité du quinoa tient au fait qu'il s'agit d'une graine consommée comme une céréale. En général, cet aliment est cuit et ajouté à des soupes ou bien réduit en une farine qui sert à préparer du pain, des boissons et de la bouillie. Du point de vue nutritionnel, il apporte autant d'énergie que les aliments utilisés de façon similaire, comme les haricots, le maïs, le riz ou le blé (tableau 9). Le quinoa est en outre une source importante de protéines de qualité, de fibres alimentaires, d'acides gras polyinsaturés et de sels minéraux. Toutefois, bien qu'il fournisse de nombreux nutriments en quantité non négligeable, il convient de l'intégrer à un repas équilibré comportant de nombreux autres types d'aliments afin de se nourrir convenablement (Koziol., 1992).

Tableau 9 : Teneurs en macronutriments du quinoa et d'autres aliments (pour 100 grammes de poids sec) (Koziol., 1992)

	Quinoa	Haricots	Mais	Riz	Blé
Energie (Kcal/100g)	399	367	408	372	392
Protéines (g/100g)	16,5	28	10,2	7,6	14,3
Lipides (g/100g)	6,3	1,1	4,7	2,2	2,3
Glucides totaux (g/100 g)	90	61,2	81,1	80,4	78,4

Le tableau 10 : représente un récapitulatif des valeurs énergétique et nutritionnelle des graines de quinoa

Tableau 10 : Valeurs énergétique et nutritionnelles pour 100 g de quinoa (FAO)

Nom des constituants	Unité	Teneur moyenne
Energie	kcal	351
Eau	g	12,7
Protéines	g	14,8
Glucides	g	58,5
Fibres alimentaires	g	6,64
Lipides	g	5,04
Sodium	mg	9,6
Magnésium	mg	276
Phosphore	mg	328
Potassium	mg	804
Calcium	mg	80
Manganèse	mg	2,8
Fer	mg	8
Cuivre	mg	0,79
Zinc	mg	2,5
Vitamine B1 ou Thiamine	mg	0,17
Vitamine B2 ou Riboflavine	mg	0,4
Vitamine B3 ou PP ou Niacine	mg	0,45

CHAPITRE IV

PROPRIÉTÉS PHARMACOLOGIQUES ET NUTRITIONNELLES

Outre leur intérêt nutritionnel, les graines de quinoa offrent une large gamme de composés chimiques dont les propriétés thérapeutiques sont activement étudiées depuis quelques années. En effet, le milieu scientifique prend conscience de la valeur du quinoa dans la problématique de la santé humaine et évalue son potentiel en tant que ressource pour le développement d'aliments fonctionnels (Herbillon Marie, 2015).

Les précurseurs de ce concept apparu dans les années 1980 sont les autorités japonaises qui réalisent qu'une amélioration de la qualité de vie était primordiale au sein de la population âgée croissante, sans que cela n'empêche considérablement sur le coût des soins de santé. Ce concept alimentaire a ensuite été adopté par les américains puis les européens, cependant sa définition fait l'objet de nombreuses contradictions. En résumé, « un aliment peut être considéré comme fonctionnel s'il a été démontré de façon satisfaisante qu'il exerce un effet bénéfique sur une ou plusieurs fonctions cibles de l'organisme, au-delà des effets nutritionnels de base, de manière à améliorer la santé et le bien-être et/ou à réduire le risque de maladie » (définition proposée par l'ILSI Europe en 1998) (Herbillon Marie, 2015).

Par ailleurs, certains composés bioactifs ont montré des propriétés pharmacologiques intéressantes, laissant entrevoir de possibles applications dans le domaine pharmaceutique. Ce constat concerne également des composés initialement destinés à être éliminés, ce qui permettrait à terme d'utiliser ces sous-produits. L'exemple le plus flagrant est celui des saponines contenues dans l'enveloppe des graines. Responsables de leur amertume, réputées toxiques et reconnues comme étant les principaux facteurs antinutritionnels du quinoa, elles présentent néanmoins un grand nombre d'activités biologiques (Herbillon Marie, 2015).

Précisons que dans certains cas, et en particulier concernant les saponines, les activités rapportées n'ont pas systématiquement été étudiées avec le quinoa, toutefois il existe suffisamment de preuves de leurs effets dans d'autres végétaux (Herbillon Marie, 2015).

I. Propriétés pharmacologiques

1. Activité anti-inflammatoire

Plusieurs rapports montrent que la plupart des plantes ayant des saponines possèdent une activité anti-inflammatoire (Navarro *et al.*, 2001 ; Cho *et al.*, 2001 ; Kang *et al.*, 2005). Les résultats concernant les saponines du quinoa suggèrent qu'elles pourraient être utilisées pour la prévention et le traitement de l'inflammation. Elles pourraient, par exemple, représenter un avantage thérapeutique majeur dans diverses maladies induites par des taux pathologiques de NO résultant de la promotion de l'inflammation, la carcinogénèse ou l'athérosclérose (Herbillon Marie, 2015).

L'acide 3-O-b-D-glucopyranosyl oléanolique (Figure 18), une saponine de type monodesmosidique issue des graines de quinoa (Ma *et al.*, 1989) et d'abord isolée à partir des graines de *Randia dumetorum* Lam., a montré une activité anti-inflammatoire significative dans les phases exsudative et proliférative de l'inflammation à des doses comprises entre 25 et 100 mg/kg (avec des valeurs de DL₅₀ de 3600 mg/kg chez la souris et 1500 mg/kg chez le rat) (Ghosh *et al.*, 1983).

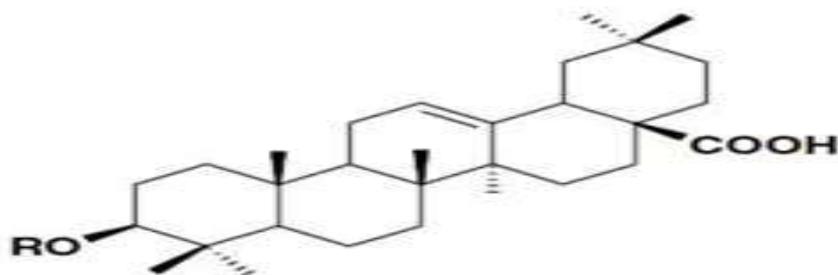


Figure18 : Structure de l'acide 3-O-b-D-glucopyranosyl oléanolique (Herbillon Marie., 2015)

2. Activité antioxydante

Un grand nombre de composés retrouvés dans les graines de quinoa ont démontré des capacités antioxydantes. On retrouve impliqués des composés bioactifs de nature lipophile (tocophérols, caroténoïdes) et hydrophile (acides phénoliques, flavonoïdes, bétalaïnes), ainsi que des saponines (Herbillon Marie, 2015).

Les lipides du quinoa sont signalés comme généralement stables contre l'oxydation, en dépit de leur haute teneur en acides gras insaturés (> 85%). En fait, ces lipides comptent la présence de quantités abondantes de composés antioxydants, à savoir des tocophérols et des caroténoïdes (Herbillon Marie, 2015).

L'activité de ces composés lipophiles a été examinée dans les extraits de 3 génotypes typiques de quinoa de couleur (blanc, rouge et noir) (Tang *et al.*, 2015a). Toutes les techniques utilisées ont montré que les activités antioxydantes étaient positivement corrélées avec les principaux caroténoïdes (*all-trans*-lutéine et *all-trans*-zéaxanthine) et tocophérols (g-tocophérol). Concernant les acides gras, seuls les acides gras polyinsaturés ont montré une corrélation positive avec l'activité antioxydante. En général, celle-ci dépend du degré de couleur de l'enveloppe de la graine, le quinoa aux graines noires ayant montré la plus forte activité suivie par le quinoa rouge puis blanc (Herbillon Marie, 2015).

Il en est de même concernant l'activité des composés hydrophiles représentés par les acides phénoliques, les flavonoïdes et les bétalaïnes. Les graines de quinoa les plus foncées présentent l'activité antioxydante la plus élevée, en relation avec leur concentration phénolique plus importante (Tang *et al.*, 2015b). Quant aux bétalaïnes, elles sont également à l'origine d'une forte activité antioxydante (Cai *et al.*, 2003).

Les propriétés antioxydantes sont largement citées lorsqu'il s'agit de prouver l'effet anticancéreux d'un aliment, un sujet sensible qui fait l'objet de nombreux débats dans la communauté scientifique. Bien que l'impact d'une telle activité sur la santé, en particulier sur la prévention ou le traitement des cancers, nécessite des études plus approfondies, le potentiel antioxydant des graines de quinoa est évident (Laus *et al.*, 2012 ; Tang *et al.*, 2015a,b).

Les activités anticancéreuses des composés phénoliques du quinoa ont été récemment étudiées mais à partir d'extraits de feuilles et non des graines (Gawlik-Dziki *et al.*, 2013). La biodisponibilité élevée de ces composés bioactifs dans les feuilles, parallèlement à leurs effets *in vitro* sur des cellules de cancer de la prostate, suggèrent qu'ils peuvent aider dans la chimio-prévention du cancer et d'autres maladies liées au stress oxydatif, telles que l'athérosclérose. On suppose que les graines de quinoa, riches en composés phénoliques, pourraient également avoir un effet bénéfique sur la

prévention ou la prise en charge de ces maladies. Cette hypothèse vient renforcer leur potentiel en tant que source de composés bioactifs mais requiert d'autres travaux pour la confirmer (Herbillon Marie, 2015).

3. Activité antiulcéreuse

Un petit groupe de polysaccharides isolés à partir des graines de quinoa, à savoir l'arabinane et les polysaccharides pectiques riches en arabinane, ont montré une activité antiulcéreuse. La gastro protection est une activité biologique qui a été précédemment rapportée pour des polysaccharides issus d'autres végétaux, tels que l'arabinogalactane (*Cereus peruvianus*, *Cactaceae*) (Tanaka et al., 2010) ou le galactomannoglucane (*Syagrus oleracea*, *Aracaceae*) (Da Silva et Parente, 2010).

L'effet protecteur gastrique de ces polysaccharides a été évalué sur des rats en utilisant des lésions gastriques aiguës induites par de l'éthanol (Cordeiro et al., 2012). Ces lésions sont associées à la capacité de l'éthanol à dissoudre la couche de mucus gastrique, ainsi qu'à stimuler la sécrétion d'histamine, de pepsine et d'ions H⁺. Elles sont caractérisées par des zones diffuses et marquées d'hémorragie dans l'estomac (Herbillon Marie, 2015).

4. Activité antifongique

Les saponines du quinoa présentent une activité antifongique importante puisqu'elles inhibent la croissance de *Candida albicans* à 50 µg/mL. Cet effet a été observé avec un mélange brut de saponines, tandis que les saponines individuelles pures ont montré peu ou pas d'activité, ce qui suggère un effet synergique (Woldemichael et Wink, 2001).

Plus récemment, les saponines contenues dans l'enveloppe des graines de quinoa ont également montré une activité contre *Botrytis cinerea*. Comme pour l'activité molluscicide, les extraits de saponines non traités n'ont montré qu'une activité minimale, tandis qu'après un traitement alcalin, la croissance mycélienne et la germination des conidies étaient significativement inhibées. On suppose encore que cette opération entraîne la formation de dérivés de saponines plus hydrophobes ayant une plus grande affinité pour les stérols présents dans les membranes cellulaires (Stuardo et San Martín, 2008).

II. Nutrition

1. Gluten-free

Ce que nous appelons communément le gluten est en fait un mélange de deux familles de protéines, les prolamines et les gluténines. Certaines protéines de la famille des prolamines se retrouvent dans de nombreuses céréales comme le blé, le seigle ou l'orge. Ce sont ces protéines qui sont considérées comme toxiques pour les personnes atteintes de la maladie cœliaque. Nous avons vu que les protéines du quinoa ne contiennent pas, ou très peu, de prolamines. Bien que les experts conseillent de traiter cette affirmation avec prudence en attendant que d'autres études confirment cette idée, le quinoa est aujourd'hui considéré comme une pseudocéréale sans gluten (Herbillon Marie, 2015).

On remarque actuellement une certaine tendance à la diminution de notre consommation de gluten. D'une part, le nombre de personnes présentant une simple intolérance au gluten augmente, d'autre part, nous lui attribuons divers maux tels que fatigue généralisée, désordres digestifs ou baisses de moral inexplicables. En outre, l'élimination stricte de cette protéine du régime alimentaire est à ce jour le seul traitement acceptable pour les personnes atteintes de la maladie cœliaque (Herbillon Marie, 2015).

La maladie cœliaque est une entéropathie auto-immune déclenchée par l'ingestion de grains contenant de gluten chez des individus probablement prédisposés génétiquement. La consommation de ces aliments provoque des dommages auto-entretenus dans la muqueuse intestinale dont la fonctionnalité devient sévèrement altérée. On sait que cette maladie peut se manifester à n'importe quel âge et que ses présentations cliniques sont extrêmement variables. La plus connue est le syndrome de malabsorption typique se manifestant par de la diarrhée chronique, une perte de poids et une distension abdominale. Il peut également arriver que la maladie soit silencieuse ou que les symptômes prédominants soient extra-intestinaux (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010b ; Capriles et Areas, 2014 ; Elgeti *et al.*, 2014).

Ces préoccupations ont donné lieu à des recherches visant à trouver des solutions de rechanges aux céréales communes contenant du gluten, comme les pseudocéréales. Les grains du quinoa sont naturellement riches en nutriments et leur incorporation dans l'alimentation des patients intolérants au gluten permettrait non seulement d'ajouter de la variété mais aussi d'améliorer sa qualité nutritionnelle (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010b ; Capriles et Areas, 2014 ; Elgeti *et al.*, 2014).

Toutefois, la commercialisation de ces produits est encore assez limitée puisque la fabrication de produits de boulangerie de haute qualité et sans gluten représente un véritable challenge technologique. En effet, le gluten est responsable des propriétés viscoélastiques de la pâte et lui permet de gonfler pour donner un pain aéré. Son absence complique considérablement la formulation de produits à base de quinoa qui fait l'objet de nombreux travaux visant à améliorer la consistance de ces produits, ceci sans en altérer les propriétés nutritionnelles (Alvarez-Jubete *et al.*, 2010b ; Capriles et Areas, 2014 ; Elgeti *et al.*, 2014).

2. Effet bénéfique sur le système cardiovasculaire

Les graines de quinoa présentent des propriétés sur le système cardio-vasculaire. Elles les doivent principalement à leur teneur en acides gras insaturés et en phytostérols qui ont un effet bénéfique sur le cholestérol, un facteur de risque connu des maladies cardiovasculaires (Ryan *et al.*, 2007).

Les acides gras mono- et polyinsaturés (oméga-3 et oméga-6) sont aujourd'hui reconnus pour leur effet protecteur sur le système cardio-vasculaire. Leur principal effet est l'amélioration du profil des lipides sanguins, d'une part en aidant à réduire le cholestérol LDL dans le sang, d'autre part certains acides gras augmentent le taux de cholestérol HDL (« bon » cholestérol) qui contribue à l'élimination des triglycérides du sang (Elmadfa et Kornsteiner, 2009). On note également une action de ces acides gras sur la pression artérielle, les réactions anti-inflammatoires et les arythmies (Abeywardena *et al.*, 1991). De plus, il est prouvé que le remplacement des graisses saturées par des graisses insaturées dans le régime alimentaire est beaucoup plus efficace dans la réduction du risque de maladie coronarienne que de réduire simplement la consommation totale de matières grasses (Ryan *et al.*, 2007).

La capacité des phytostérols à réduire le cholestérol a été particulièrement étudiée. Ces stérols végétaux inhibent l'absorption intestinale du cholestérol et abaissent ainsi le taux de cholestérol plasmatique total et des lipoprotéines de basse densité (LDL) (De Jong *et al.*, 2003 ; Berger *et al.*, 2004). Lorsqu'ils sont consommés par l'intermédiaire de produits enrichis, ces composés végétaux bioactifs permettent de réduire de façon significative le taux de « mauvais » cholestérol ou LDL (De Jong *et al.*, 2003).

D'autres composés ont montré une capacité à abaisser le taux de cholestérol. C'est le cas par exemple des saponines qui sont supposées former des complexes avec le cholestérol dans la lumière intestinale, rendant ainsi le cholestérol moins disponible pour la réabsorption (Basu et Rastogi, 1967). La réduction de la cholestérolémie ferait également partie des nombreux effets bénéfiques des ecdystéroïdes sur la santé (Seidlová-Wuttke *et al.*, 2010).

3. Effet antidiabétique et anti-obésité

Les phytoecdystéroïdes, et en particulier la 20-hydroxyecdysone (20-HE), jouent un rôle certain dans le traitement et la prévention du diabète et de l'obésité. L'effet anti-obésité des ecdystéroïdes du quinoa est l'activité la plus étudiée parmi tous leurs effets potentiels sur la santé humaine. La supplémentation d'un régime alimentaire riche en matières grasses avec un extrait de quinoa enrichi en 20-HE ou en 20-HE pur chez des souris entraîne une réduction de l'accumulation de graisse et une diminution de la taille moyenne des adipocytes (Foucault *et al.*, 2008 ; Kizelsztejn *et al.*, 2009).

L'effet d'une prise chronique d'extrait de quinoa sur les différentes composantes du métabolisme énergétique a également été examiné grâce à la calorimétrie indirecte. Les résultats ont montré que l'effet anti-obésité observé pouvait s'expliquer par une augmentation globale des dépenses d'énergie, un changement dans le métabolisme du glucose allant vers l'oxydation (au détriment de la lipogénèse) et une diminution de l'absorption des lipides alimentaires avec une réduction du stockage dans le tissu adipeux (Foucault *et al.*, 2014).

Les phytoecdystéroïdes contenus dans la graine de quinoa présentent également un effet bénéfique sur le diabète. L'administration d'un extrait concentré a diminué de manière significative

le taux de glucose sanguin chez un modèle de souris soumises à une alimentation induisant obésité et hyperglycémie (Graf *et al.*, 2014). Les effets hypoglycémiques de cet extrait, combinés avec les rapports précédents sur les effets antidiabétiques et anti-obésité de l'administration chronique de 20-HE, soutiennent le potentiel de cet extrait pour traiter ou prévenir l'hyperglycémie et la résistance à l'insuline associée au syndrome métabolique humain (Foucault *et al.*, 2011 ; Kizelsztejn *et al.*, 2009)

Concernant la biodisponibilité du 20-HE, elle est excellente puisqu'il a été récupéré non dégradée dans les graines après 20 minutes d'ébullition. Il en est de même pour la plupart des produits alimentaires à base de quinoa qui conservent la plupart de leur contenu originel en ecdystéroïdes. A noter également que l'élimination des saponines par polissage des graines ne modifie pas la teneur en ecdystéroïdes (Kumpun *et al.*, 2011).

L'alimentation occidentale, traditionnellement pauvre en phytoecdystéroïdes (Findeisen, 2004) peut donc s'enrichir en ces molécules en consommant davantage de quinoa et ainsi profiter de ces effets bénéfiques. La consommation d'une portion de 50 g de graines apporterait environ 15 mg de 20-HE (Kumpun *et al.*, 2011).

4. Fibres alimentaires

Les graines de quinoa présentent un pourcentage élevé de fibres alimentaires, réputées pour leurs nombreux effets bénéfiques sur la santé humaine, les principaux concernant la fonction intestinale. Les fibres alimentaires permettent la bonne régulation du transit grâce à divers effets mécaniques et sont d'ailleurs utilisées en thérapeutique pour soulager certains troubles digestifs (constipation). Les fibres solubles, au contact des liquides dans le côlon, deviennent visqueuses et favorisent le glissement des résidus. Quant aux fibres insolubles, elles présentent un pouvoir de gonflement élevé qui permet d'augmenter le volume du bol alimentaire et de faciliter l'évacuation des selles (Brownawell *et al.*, 2012).

Une alimentation riche en fibres contribue également à réguler le taux de cholestérol, de stimuler le développement de la flore bactérienne, et de réduire le risque de calculs biliaires. En outre, des études épidémiologiques ont montré une relation inverse entre la consommation de fibres et le développement de maladies cardio-vasculaires, l'obésité et le diabète de type 2 (Brownawell *et al.*, 2012).

L'influence des fibres sur la prévention de l'obésité se comprend aisément. En effet, les fibres alimentaires ont la capacité d'absorber l'eau et de rester plus longtemps dans l'estomac. C'est ainsi que le quinoa produit un sentiment de satiété avec un faible volume de graines (FAO, 2011 ; Valcárcel-Yamani et Da Silva Lannes, 2012), ce qui limite le risque de suralimentation et favorise la perte de poids.

De plus, le régime riche en fibres est réputé pour protéger du cancer du côlon. Cependant, les études n'ont pas confirmé cette hypothèse et tendent à relativiser cet effet. Il semble que le bénéfice escompté puisse dépendre de l'origine et de la nature des fibres (Asano et McLeod, 2002 ; Astorg *et al.*, 2002).

III. Anti nutrition

1. Généralités sur les facteurs antinutritionnels

Les composés et substances produits dans les aliments d'origine naturelle qui ont pour effet de réduire l'apport en éléments nutritifs, de nuire à la digestion, l'absorption et à l'utilisation métabolique de ces nutriments et pouvant produire d'autres effets indésirables, comme compromettre la croissance et le fonctionnement normal du corps des consommateurs quotidiens, sont appelés antinutriments ou facteurs antinutritionnels (Akande, 2010).

Les principaux facteurs antinutritionnels sont représentés par des saponines, des composés polyphénoliques (principalement des tanins condensés), des phytates, des oxalates, des lectines (phytohémagglutinines), des inhibiteurs de protéase, des glycosides cyanogéniques, des flavonoïdes, le gossypol (polyphénol contenu en abondance dans les graines de certains cotonniers du genre *Gossypium*)... mais la liste est inépuisable (Akande, 2010).

Tandis que les inhibiteurs de protéase et les lectines constituent les principaux facteurs antinutritionnels rencontrés dans les graines des légumineuses, les saponines et l'acide phytique sont les plus représentatifs de la graine de quinoa. D'autres facteurs antinutritionnels, tels que les inhibiteurs de trypsine et les tanins, sont également présents en plus faibles quantités (Doublecz, 2011 ; Valencia-Chamorro, 2003). Toutefois, bien que la plupart de ces substances aient été montrées comme étant nocives pour la santé, certaines ont montré qu'elles pouvaient être avantageuses pour la santé humaine et animale dans la mesure où elles sont consommées à des montants appropriées (Kersten *et al.*, 1991 ; Sugano *et al.*, 1993).

2. Effet néfaste sur la croissance

Les saponines sont le principal facteur antinutritionnel des graines de quinoa. Des études chez le rat ont montré que les animaux nourris avec du quinoa amer non lavé développaient une aversion alimentaire importante et une réduction de l'efficacité de la conversion alimentaire (indice mesurant l'efficacité de l'ingestion d'aliments sur le gain de poids vif d'un animal) avec pour conséquences des dommages de croissance (Gee *et al.*, 1993).

3. Effet néfaste sur l'oxalurie

La consommation d'aliments riches en oxalates peut induire, ou aggraver, une hyperoxalurie, allant parfois jusqu'à entraîner une insuffisance rénale aiguë (Hesse *et al.*, 1993 ; Chen *et al.*, 2001). Le traitement de ces hyperoxaluries commence avec la restriction d'aliments riches en oxalate. Cependant, sans une connaissance suffisante de la teneur en oxalate alimentaire, des directives alimentaires ne peuvent être établies (Siener *et al.*, 2006).

C'est pour cette raison que les concentrations en oxalate total et soluble ont été déterminées dans un certain nombre de plantes connues pour accumuler des quantités notables d'oxalate, à savoir l'amarante (*Amaranthaceae*), le sarrasin, la rhubarbe et l'oseille (*Polygonaceae*) ainsi que le quinoa, la betterave, les blettes et les épinards (*Chenopodiaceae*) (Siener *et al.*, 2006).

Dans ces familles de plantes, l'oxalate s'est accumulé dans différents tissus végétaux, autant dans les feuilles, les tiges et les graines que dans les racines. On constate que les concentrations en oxalate soluble et total des graines du quinoa (131 et 184 mg/100g) ne sont pas excessives au regard des autres plantes étudiées, et sont même nettement inférieures aux taux retrouvés dans les tiges de

rhubarbe (380 et 1235 mg/100g), les feuilles d'oseille (258 et 1391 mg/100g), de blettes (327 et 874 mg/100g) ou d'épinards (1029 et 1939 mg/100g) (Siener et *al.*, 2006).

4. Elimination des facteurs antinutritionnels ou annulation de leurs effets

L'étude poussée de la composition des graines de quinoa montre bien que la formulation d'un régime alimentaire recommandé ne peut être fondée uniquement sur les valeurs des teneurs en nutriments des aliments en raison des interactions diverses entre les nutriments et les facteurs antinutritionnels dans l'alimentation. Heureusement, il existe de nombreuses solutions pour éliminer partiellement ou totalement ces facteurs antinutritionnels, ou encore pour en réduire les effets néfastes (Herbillon Marie, 2015).

Les saponines, par exemple, sont avant tout localisées dans les couches externes de la graine de quinoa, notamment le péricarpe (Bhargava et *al.*, 2006), ce qui facilite leur élimination par décorticage abrasif ou par une méthode plus traditionnelle consistant à laver les grains avec de l'eau (Reichert et *al.*, 1986). L'application d'un tel traitement lors de la fabrication d'une céréale pour nourrissons a permis non seulement d'augmenter la qualité nutritionnelle du produit à un niveau similaire à celui d'un produit céréalier à base de blé, mais également d'en améliorer la texture et le goût (Gee et *al.*, 1993).

En ce qui concerne les phytates, leur déphosphorylation semble être la condition préalable pour améliorer la valeur nutritionnelle des graines. En effet, l'élimination des groupements phosphates à partir de l'anneau d'inositol a pour effet de diminuer la force de liaison aux minéraux ; permettant ainsi une augmentation de la biodisponibilité des minéraux essentiels (Sandberg et *al.*, 1999).

D'une façon générale, les principaux efforts déployés pour réduire la quantité de phytates dans les aliments consistent en diverses transformations et techniques de préparation, avec par exemple l'addition d'enzymes exogènes. Le traitement des aliments (trempage, germination, cuisson, fermentation) permet l'hydrolyse des phytates en augmentant l'activité de dégradation d'une enzyme naturellement présente dans les plantes et les micro-organismes, la phytase. Cependant, dans des conditions de traitement classiques tels que les pâtes ou la fabrication du pain, des conditions optimales de dégradation des phytates sont rarement atteintes, c'est pourquoi l'ajout d'enzymes exogènes devient souhaitable (Herbillon Marie, 2015).

Récemment, l'introduction de phytases de bifidobactéries dans la fabrication de pain à base de farine de quinoa a démontré son efficacité dans l'augmentation de la biodisponibilité des minéraux (Iglesias-Puig et *al.*, 2015). Cette solution a déjà été exploitée dans l'alimentation animale en ajoutant des phytases dans le régime de porcs, de volailles et de poissons, mais ce n'est pas encore le cas dans le marché de l'alimentation humaine. Cette enzyme a donc une application potentielle importante dans la nutrition humaine, à la fois pour la dégradation des phytates au cours du traitement des aliments et dans le tractus gastro-intestinal (Kumar et *al.*, 2010).

Pour les inhibiteurs de trypsine, il s'avère que les plus hautes teneurs détectées dans les graines de quinoa (1,36 à 5,04 TIU/mg) sont bien inférieures à celles rapportées pour des graines d'usage courant dans l'alimentation humaine telles que les haricots (12,9 à 42,8 TIU/mg) ou les lentilles (17,8 TIU/mg) (Romero, 1981) ; il a alors été conclu qu'elles étaient négligeables et qu'elles ne posaient pas de problème grave (Ahamed et *al.*, 1998 ; Improta et Kellems, 2001). De plus, les inhibiteurs de trypsine présents dans le quinoa ont la particularité d'être thermolabiles, contrairement à la plupart des inhibiteurs d'enzymes protéolytiques qui présentent une stabilité élevée à la chaleur. Ces facteurs

antinutritionnels peuvent donc être facilement inactivés par cuisson, extrusion ou lavage à chaud (Romero, 1981 ; Ruales et Nair, 1993b ; Singh et Rao, 2002).

Concernant les oxalates, le traitement de la nourriture et la préparation des aliments conduit à différents degrés de perte. Il a été démontré que l'ébullition était une bonne stratégie pour réduire la teneur en oxalate des aliments, l'oxalate soluble est ainsi éliminé et se retrouve dans l'eau de cuisson (Savage et *al.*, 2000). Cependant, les pourcentages de réduction de l'oxalate soluble et insoluble par différentes méthodes de cuisson, comme l'ébullition, la vapeur ou le blanchiment, n'ont pas été comparés à ce jour. En outre, le montant de l'oxalate présent dans une plante peut varier sur une large gamme, en fonction des conditions de croissance, de la saison, du climat et du stade de développement de la plante (Siener et *al.*, 2006).

IV. Toxicité

1. Potentiel allergisant

Le potentiel allergisant du quinoa a été étudié chez des cobayes à l'aide d'extrait de quinoa poli débarrassé de ses saponines. La réponse immunitaire a été évaluée selon un protocole d'anaphylaxie cutanée passive. Le quinoa s'est révélé contenir des composés capables de provoquer une réaction d'hypersensibilité inférieure à celle du blanc d'œuf et du lait de vache et à peu près égale à celle du soja (Koziol, 1992).

De plus, l'absence de gluten contribue à faire du quinoa un aliment peu allergisant. Par conséquent, il peut être utilisé dans les aliments destinés à réduire les allergies chez les personnes sensibles, comme les personnes atteintes de la maladie cœliaque.

2. Activité lytique

2.1 Activité hémolytique

Les saponines ont tendance à altérer la perméabilité cellulaire et, par conséquent, exercent une toxicité générale sur tous les tissus organisés. Il a été avancé comme hypothèse que les différentes saponines pouvaient produire différentes modifications structurelles dans les lipides des membranes cellulaires mais il reste à élucider la relation exacte de ces changements structurels avec l'hémolyse. Cette propriété a été étudiée sur des cellules saines et néoplasiques et aucune différence de comportement n'a été établie (Basu et Rastogi, 1967).

Nous avons vu précédemment que les saponines monodesmosidiques ont montré une activité hémolytique supérieure aux saponines de type bidesmosidique car seuls les monodesmosides agissent comme détergents et peuvent lyser les biomembranes (Woldemichael et Wink, 2001).

L'activité hémolytique est représentée comme dépendante de la longueur des chaînes glucidiques, ainsi que de la présence d'une chaîne glucidique en C3 ou de groupes fonctionnels sur la saponine (Voutquenne et *al.*, 2002), ce qui suggère que l'augmentation du caractère lipophile de la saponine via l'estérification des groupements carboxyliques tend à faciliter l'interaction avec les membranes cellulaires. En outre, la présence d'un acide carboxylique libre en C28 semble essentielle pour la cytotoxicité (Quetinleclercq et *al.*, 1992 ; Oda et *al.*, 2000 ; Woldemichael et Wink, 2001)

Les saponines triterpéniques du quinoa sont extrêmement toxiques pour les animaux à sang froid mais leur toxicité orale pour les mammifères est faible (Dini et *al.*, 2001a,b).

2.2 Activité sur la perméabilité intestinale

Les saponines du quinoa présentent une activité membranolytique contre les cellules de l'intestin grêle. Les conséquences sont une augmentation de la perméabilité de la muqueuse intestinale, ainsi qu'une perturbation du transport actif qui entraîne une diminution de la capacité à accumuler des éléments nutritifs, un effet qui dépend de la structure de la saponine (Johnson et *al.*, 1986 ; Gee et *al.*, 1989).

Cette activité membranolytique a été clairement démontrée sur des rats (Gee et *al.*, 1993), en particulier avec les variétés de quinoa les plus amères auxquelles était associée une aversion marquée pour l'alimentation ainsi qu'une réponse de croissance altérée.

On peut supposer qu'une consommation prolongée de saponines provoquerait une augmentation de l'absorption des antigènes par l'intestin grêle, ce qui serait particulièrement indésirables chez les nourrissons (Gee et *al.*, 1993). Le traditionnel lavage à l'eau des graines s'est révélé le plus efficace pour réduire l'activité défavorable sur la muqueuse intestinale (Gee et Johnson, 1988).

Conclusion

Le quinoa est une plante ancestrale originaire d'Amérique du Sud où elle représentait une culture vivrière essentielle pour les peuples andins il y a plusieurs milliers d'années. Durant leur règne, les Incas lui confèrent un caractère sacré. Dénigrée par les conquistadors espagnols qui lui préfèrent les céréales occidentales, la culture du quinoa connaît ensuite une longue décadence, jusqu'à tomber dans l'oubli.

Considérée à tort comme une « céréale », cette plante fait partie de la famille des *Amaranthaceae* et du groupe des « pseudocéréales », au même titre que l'amarante ou le sarrasin. Elle a la particularité de s'adapter aux conditions défavorables, ce qui lui permet de résister à la fois au gel, à la sécheresse, au vent, à la salinité et à la pauvreté des sols.

Il y a quarantaine d'années, le Monde redécouvre cette plante et commence à s'intéresser à la composition chimique exceptionnelle de ses graines. Selon les variétés, celles-ci renferment entre 12 et 24% de protéines de haute qualité nutritionnelle puisqu'elles sont riches en tous les acides aminés essentiels, y compris la lysine et la méthionine qui se trouvent limitées dans les céréales ou les légumineuses. En outre, elles présentent des teneurs intéressantes en histidine et en arginine, des acides aminés indispensables pendant l'enfance, laissant envisager une utilisation du quinoa dans les aliments destinés aux nourrissons.

Les graines contiennent une fraction d'huile très intéressante sur le plan nutritif puisqu'elle est riche en acides gras polyinsaturés, principalement l'acide linoléique (oméga-3) et l'acide α -linoléique (oméga-6), en proportions appropriées par rapport aux recommandations. Elles présentent en plus des niveaux adéquats en vitamines et en minéraux, particulièrement en fer, calcium, phosphore, magnésium et potassium.

Si la présence de substances antinutritionnelles dans la graine menace de diminuer la biodisponibilité de tous ces nutriments, il existe néanmoins des solutions pour les éliminer totalement ou en partie. Les saponines, composés amers et particulièrement toxiques, sont heureusement localisées dans les couches externes de la graine et peuvent donc facilement être éliminées par lavage ou abrasion mécanique. De plus, les nombreuses études portant sur la biodisponibilité sont rassurantes et confirment les remarquables qualités nutritives des graines de quinoa, d'ailleurs équivalentes à la protéine de lait qui est une référence sur le plan diététique.

Autre intérêt non négligeable, le quinoa est dépourvu de gluten, faisant de lui un aliment précieux pour les personnes souffrantes de la maladie cœliaque dont le régime restrictif et le manque de choix dans leur alimentation entraîne souvent des carences alimentaires. Par ailleurs, les graines sont particulièrement riches en glucides avec une forte proportion en amidon, dont les caractéristiques physico-chimiques et fonctionnelles permettent des applications non-alimentaires comme les industries pharmaceutiques ou de textile.

Plus récemment, la recherche se focalise sur l'examen approfondi des composés chimiques bioactifs contenus dans les graines. D'une part, certaines de ces substances ont montré des propriétés pharmacologiques qui laissent entrevoir une possible utilisation du quinoa comme source de principes actifs dans la formulation de produits pharmaceutiques. Les saponines, par exemple, ont démontré une certaine efficacité en tant qu'adjuvants pour des vaccins administrés par voie muqueuse, d'autres molécules ont des effets anti-inflammatoires ou antifongiques ainsi que des effets antibactériens.

D'autre part, d'autres composants ont démontré des propriétés nutritionnelles précieuses pour la santé humaine, avec entre autres des effets bénéfiques sur les maladies métaboliques comme le diabète ou l'obésité. Une alimentation riche en quinoa contribuerait d'ailleurs au contrôle de la cholestérolémie, un facteur de risque connu des maladies cardiovasculaires.

Ces propriétés bénéfiques tendent à considérer le quinoa comme un véritable « aliment fonctionnel ». Le quinoa fait ainsi partie intégrante de la stratégie de lutte contre les maladies chroniques mais aussi la faim et la malnutrition dans certains pays. De la même façon, le quinoa pourrait constituer une source intéressante dans la fabrication de compléments alimentaires en isolant les constituants que l'on qualifie aujourd'hui de « produits nutraceutiques ». Cependant, de vastes défis et opportunités subsistent dans les secteurs scientifiques, agricoles et de développement pour optimiser le rôle du quinoa dans la promotion de la santé humaine et la nutrition mondiale.

RESUME

Le quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) est une plante herbacée de la famille des *Amaranthaceae*. Originaires d'Amérique du Sud, elle se distingue par sa grande capacité d'adaptation aux conditions écologiques difficiles. Cette plante à graines, souvent confondue avec les céréales communes, est aujourd'hui considérée comme une « pseudocéréale ». Dans les années 1970, le monde redécouvre cette culture et commence à plébisciter la qualité nutritionnelle de ses graines, due notamment à une haute teneur en protéines et à une excellente balance en acides aminés essentiels, mais aussi à sa richesse en oméga 3 et 6. Cependant, il a pour désavantage de présenter des substances dites « antinutritionnelles » qui nécessitent donc d'être éliminées. Dépourvu de gluten, le quinoa a su s'imposer dans le régime des sujets souffrant de la maladie cœliaque. De plus, il s'avère renfermer un certain nombre de composés chimiques bioactifs dont l'étude des diverses propriétés thérapeutiques occupe activement le secteur scientifique. Le quinoa est recherché dans plusieurs industries que ce soit l'industrie alimentaire, pharmacologique, cosmétiques... , et cela en tant que plante (utilisation des feuilles, graines, ou tige) ou bien ces extraits (saponines, huile végétale et essentiel, ...) Nous proposons dans ce travail d'exposer les aspects botaniques de la plante du quinoa, puis en citer quelques techniques et procédés utilisés pour les principales extractions réalisables sur la plante du quinoa. Nous répertorions également la composition chimique et valeurs nutritionnelles du quinoa, ainsi que les principales propriétés pharmacologiques et nutritionnelles des composés bioactifs. Pour terminer nous évoquerons les effets des substances antinutritionnelles tout en discutant des différents moyens mis en œuvre pour les éliminer.

Mots clés : Quinoa - Huiles essentielles – Saponines – Gluten - Nutrition.

ABSTRACT

Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) is a herbaceous plant in the *Amaranthaceae* family, Originally from South America, it is distinguished by its great ability to adapt to difficult ecological conditions. This seed plant, often confused with common cereals, is now considered a "pseudocereal". In the 1970s, the world rediscovered this crop and began to praise the nutritional quality of its seeds, due in particular to a high protein content and an excellent balance in essential amino acids, but also to its richness in omega 3 and 6. However, it has the disadvantage of presenting so-called "anti-nutritional" substances; and therefore, need to be eliminated. Gluten-free, quinoa has imposed itself in the diet of people with celiac disease. In addition, it is found to contain a number of bioactive chemical compounds whose various therapeutic properties are actively studied in the scientific field. Quinoa is sought in several industries whether it is the food industry, pharmacology, cosmetics, etc., as a plant (use of leaves, seeds, or stem) or these extracts (saponins, vegetable oil and essential, ...) In this work, we propose to expose the botanical aspects of the quinoa plant, then cite some techniques and processes used for the main achievable extractions on the quinoa plant. We also list the chemical composition and nutritional values of quinoa, as well as the main pharmacological and nutritional properties of bioactive compounds. Finally, we will discuss the effects of anti-nutritional substances while discussing the different means implemented to eliminate them.

Keywords: Quinoa - Essential oils - Saponins - Gluten - Nutrition.

ملخص

الكينوا نبات عشبي في الأصل من أمريكا الجنوبية، تتميز بقدرتها الكبيرة على التكيف مع الظروف البيئية الصعبة. غالبًا ما يتم الخلط بين نبتة البذور هذه والحبوب الشائعة، وتعتبر اليوم "حبوب كاذبة". في سبعينيات القرن الماضي، اكتشف العالم هذا المحصول وبدأ بنثي على الجودة الغذائية لبذوره، ويرجع ذلك على وجه الخصوص إلى محتواها العالي من البروتين والتوازن الممتاز في الأحماض الأمينية الأساسية، ولكن أيضًا لغناها بأوميغا 3 و6. ومع ذلك، فإن لها عيوبًا تتمثل في وجود ما يسمى بالمواد "المضادة للتغذية" والتي يجب بالتالي التخلص منها. خلوها من الغلوتين يجعلها أساسية في النظام الغذائي للأشخاص المصابين بمرض الاضطرابات الهضمية. بالإضافة إلى ذلك، وجد أنه يحتوي على عدد من المركبات الكيميائية النشطة بيولوجيًا التي تشارك بنشاط في دراسة الخصائص العلاجية المختلفة في المجال العلمي. يُطلب الكينوا في العديد من الصناعات، سواء كانت صناعة الأغذية، أو الصيدلة، أو مستحضرات التجميل، وما إلى ذلك، كنبات (استخدام الأوراق، أو البذور، أو الساق) أو كمستخلصات (صابونين، زيت نباتي، زيت عطري، إلخ). نقترح في هذا العمل الكشف عن الجوانب النباتية لنبتة الكينوا، ثم نذكر بعض التقنيات والعمليات لاستخدامها في المستخلصات الرئيسية التي يمكن إجراؤها على نبات الكينوا. ندرج أيضًا التركيب الكيميائي والقيم الغذائية للكينوا، بالإضافة إلى الخصائص الدوائية والتغذوية الرئيسية للمركبات النشطة بيولوجيًا. أخيرًا، سنناقش آثار المواد المضادة للتغذية وعرض الوسائل المختلفة المطبقة للتخلص منها.

الكلمات المفتاحية: كينوا – زيوت عطرية – صابونين – جلوتين – تغذية