



HAL
open science

Le quinoa : intérêt nutritionnel et perspectives pharmaceutiques

Marie Herbillon

► **To cite this version:**

Marie Herbillon. Le quinoa : intérêt nutritionnel et perspectives pharmaceutiques. Sciences pharmaceutiques. 2015. dumas-01172250

HAL Id: dumas-01172250

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01172250v1>

Submitted on 7 Jul 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE DE ROUEN
U.F.R DE MEDECINE ET DE PHARMACIE

Année : 2015

N°

THESE POUR LE
DIPLÔME D'ETAT DE DOCTEUR
EN PHARMACIE

Présentée et soutenue publiquement le : 25 juin 2015

par

HERBILLON Marie

Née le 25 novembre 1990 à Evreux

Le Quinoa :
Intérêt nutritionnel et
perspectives pharmaceutiques

Président du jury : Mme SEGUIN Elisabeth, Professeur en Pharmacognosie

Membres du jury : Mr ELOMRI Abdelhakim, Maître de conférences en Pharmacognosie

Mme AUBER Pascale, Pharmacienne

REMERCIEMENTS

A notre Directeur de thèse,

Monsieur Abdelhakim ELOMRI, maître de conférences

Je tiens à vous remercier de m'avoir conseillé et encadré durant toutes les étapes de la réalisation de cette thèse. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de ma sincère et respectueuse reconnaissance.

A nos membres du jury,

Madame Elisabeth SEGUIN, professeur des universités

Madame Pascale AUBER, Pharmacienne

Je souhaite vous remercier d'avoir accepté de participer à la soutenance de cette thèse.

A mes parents,

Merci pour votre amour et éternel soutien durant toutes ces années.

A mes petites sœurs,

Je vous l'accorde, vous n'êtes plus si petites que ça ! Merci d'être à la fois si adorables et délicieusement insupportables...

A mes grands-parents,

Je vous remercie d'être comme vous êtes, merci Mamé pour ta présence appuyée ces derniers mois, ton intérêt et ton enthousiasme tout au long de l'avancée de ce travail.

A Matthieu,

Voilà plus de 2 ans que nous partageons (presque) tout, je veux te remercier pour ta patience et tout le soutien que tu m'as apporté, en particulier lors des moments d'incertitude et ce malgré mes (nombreuses) râleries.

A Alice et Gaétan,

Mon trinôme, mon pilier dans ses années d'études à l'université. Merci à Alice, mon binôme de TP attiré et plus jamais quitté, et Gaétan, pour tous ces moments passés ensemble.

Merci également à tous mes autres partenaires de Pharmacie, Allison, Julien, Marie, Valentin, Antoine, Caroline, Aélie... et ceux que je n'ai pas cités.

A Chloé, Jérémie, Alexandre, Elise et les autres,

Merci à cette nouvelle tribu (complètement adoptée) pour toutes ces soirées partagées, en espérant que cela durera longtemps !

Par délibération en date du 03 mars 1967, la faculté a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

ANNEE UNIVERSITAIRE 2014 - 2015
U.F.R. DE MEDECINE ET DE PHARMACIE DE ROUEN

DOYEN : **Professeur Pierre FREGER**

ASSESEURS : **Professeur Michel GUERBET**
Professeur Benoit WEBER
Professeur Pascal JOLY
Professeur Stéphane MARRET

I – MEDECINE

PROFESSEURS DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS

M. Frédéric ANSELME	HCN	Cardiologie
Mme Isabelle AUQUIT AUCKBUR	HCN	Chirurgie plastique
M. Bruno BACHY (<i>surnombre</i>)	HCN	Chirurgie pédiatrique
M. Fabrice BAUER	HCN	Cardiologie
Mme Soumeya BEKRI	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
M. Jacques BENICHOU	HCN	Biostatistiques et informatique médicale
M. Jean-Paul BESSOU	HCN	Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire
Mme Françoise BEURET-BLANQUART (<i>Surnombre</i>)	HCN	Commission E.P.P.D.P.D. Pôle Qualité
M. Guy BONMARCHAND (<i>surnombre</i>)	HCN	Réanimation médicale
M. Olivier BOYER	UFR	Immunologie
M. Jean-François CAILLARD (<i>surnombre</i>)	HCN	Médecine et santé au travail
M. François CARON	HCN	Maladies infectieuses et tropicales
M. Philippe CHASSAGNE	HB	Médecine interne (gériatrie)
M. Vincent COMPERE	HCN	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale
M. Antoine CUVELIER	HB	Pneumologie

M. Pierre CZERNICHOW	HCH	Epidémiologie, économie de la santé
M. Jean -Nicolas DACHER	HCN	Radiologie et imagerie médicale
M. Stéfán DARMONI	HCN	Informatique médicale et techniques de communication
M. Pierre DECHELOTTE	HCN	Nutrition
Mme Danièle DEHESDIN (<i>surnombre</i>)	HCN	Oto-rhino-laryngologie
M. Jean DOUCET	HB	Thérapeutique - Médecine interne et gériatrie
M. Bernard DUBRAY	CB	Radiothérapie
M. Philippe DUCROTTE	HCN	Hépto–gastro-entérologie
M. Frank DUJARDIN	HCN	Chirurgie orthopédique - Traumatologique
M. Fabrice DUPARC	HCN	Anatomie - Chirurgie orthopédique et traumatologique
M. Bertrand DUREUIL	HCN	Anesthésiologie et réanimation chirurgicale
Mme Hélène ELTCHANINOFF	HCN	Cardiologie
M. Thierry FREBOURG	UFR	Génétique
M. Pierre FREGER	HCN	Anatomie - Neurochirurgie
M. Jean François GEHANNO	HCN	Médecine et santé au travail
M. Emmanuel GERARDIN	HCN	Imagerie médicale
Mme Priscille GERARDIN	HCN	Pédopsychiatrie
M. Michel GODIN	HB	Néphrologie
M. Guillaume GOURCEROL	HCN	Physiologie
M. Philippe GRISE	HCN	Urologie
M. Didier HANNEQUIN	HCN	Neurologie
M. Fabrice JARDIN	CB	Hématologie
M. Luc-Marie JOLY	HCN	Médecine d'urgence
M. Pascal JOLY	HCN	Dermato - Vénérologie
Mme Annie LAQUERRIERE	HCN	Anatomie cytologie pathologiques
M. Vincent LAUDENBACH	HCN	Anesthésie et réanimation chirurgicale
M. Joël LECHEVALLIER	HCN	Chirurgie infantile
M. Hervé LEFEBVRE	HB	Endocrinologie et maladies métaboliques
M. Thierry LEQUERRE	HB	Rhumatologie
M. Eric LEREBOURS	HCN	Nutrition
Mme Anne-Marie LEROI	HCN	Physiologie
M. Hervé LEVESQUE	HB	Médecine interne
Mme Agnès LIARD-ZMUDA	HCN	Chirurgie infantile
M. Pierre Yves LITZLER	HCN	Chirurgie cardiaque

M. Bertrand MACE	HCN	Histologie, embryologie, cytogénétique
M. David MALTETE	HCN	Neurologie
M. Christophe MARGUET	HCN	Pédiatrie
Mme Isabelle MARIE	HB	Médecine interne
M. Jean-Paul MARIE	HCN	Oto-rhino-laryngologie
M. Loïc MARPEAU	HCN	Gynécologie - Obstétrique
M. Stéphane MARRET	HCN	Pédiatrie
Mme Véronique MERLE	HCN	Epidémiologie
M. Pierre MICHEL	HCN	Hépto-gastro-entérologie
M. Bruno MIHOUT (<i>surnombre</i>)	HCN	Neurologie
M. Jean-François MUIR	HB	Pneumologie
M. Marc MURAINÉ	HCN	Ophtalmologie
M. Philippe MUSETTE	HCN	Dermatologie - Vénérologie
M. Christophe PEILLON	HCN	Chirurgie générale
M. Jean-Marc PERON (<i>surnombre</i>)	HCN	Stomatologie et chirurgie maxillo-faciale
M. Christian PFISTER	HCN	Urologie
M. Jean-Christophe PLANTIER	HCN	Bactériologie - Virologie
M. Didier PLISSONNIER	HCN	Chirurgie vasculaire
M. Bernard PROUST	HCN	Médecine légale
M. François PROUST	HCN	Neurochirurgie
Mme Nathalie RIVES	HCN	Biologie du développement et de la reproduction
M. Jean-Christophe RICHARD (<i>détachement</i>)	HCN	Réanimation médicale - Médecine d'urgence
M. Horace ROMAN	HCN	Gynécologie - Obstétrique
M. Jean-Christophe SABOURIN	HCN	Anatomie – Pathologie
M. Guillaume SAVOYE	HCN	Hépto-gastrologie
Mme Céline SAVOYE-COLLET	HCN	Imagerie médicale
Mme Pascale SCHNEIDER	HCN	Pédiatrie
M. Michel SCOTTE	HCN	Chirurgie digestive
Mme Fabienne TAMION	HCN	Thérapeutique
M. Luc THIBERVILLE	HCN	Pneumologie
M. Christian THUILLEZ	HB	Pharmacologie
M. Hervé TILLY	CB	Hématologie et transfusion
M. Jean-Jacques TUECH	HCN	Chirurgie digestive

M. Jean-Pierre VANNIER	HCN	Pédiatrie génétique
M. Benoît VEBER	HCN	Anesthésiologie - Réanimation chirurgicale
M. Pierre VERA	CB	Biophysique et traitement de l'image
M. Eric VERIN	CRMPR	Médecine physique et de réadaptation
M. Eric VERSPYCK	HCN	Gynécologie obstétrique
M. Olivier VITTECOQ	HB	Rhumatologie
M. Jacques WEBER	HCN	Physiologie

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS

Mme Noëlle BARBIER-FREBOURG	HCN	Bactériologie – Virologie
M. Jeremy BELLIEN	HCN	Pharmacologie
Mme Carole BRASSE LAGNEL	HCN	Biochimie
Mme Valérie BRIDOUX HUYBRECHTS	HCN	Chirurgie vasculaire
M. Gérard BUCHONNET	HCN	Hématologie
Mme Mireille CASTANET	HCN	Pédiatrie
Mme Nathalie CHASTAN	HCN	Physiologie
Mme Sophie CLAEYSSENS	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
M. Moïse COEFFIER	HCN	Nutrition
M. Stéphane DERREY	HCN	Neurochirurgie
M. Eric DURAND	HCN	Cardiologie
M. Manuel ETIENNE	HCN	Maladies infectieuses et tropicales
M. Serge JACQUOT	UFR	Immunologie
M. Joël LADNER	HCN	Epidémiologie, économie de la santé
M. Jean-Baptiste LATOCHE	UFR	Biologie cellulaire
M. Thomas MOUREZ	HCN	Bactériologie
M. Jean-François MENARD	HCN	Biophysique
Mme Muriel QUILLARD	HCN	Biochimie et biologie moléculaire
M. Vincent RICHARD	UFR	Pharmacologie
M. Mathieu SALAUN	HCN	Pneumologie
Mme Pascale SAUGIER-VEBER	HCN	Génétique
Mme Anne-Claire TOBENAS-DUJARDIN	HCN	Anatomie
M. Olivier TROST	HCN	Chirurgie Maxillo Faciale

PROFESSEUR AGREGÉ OU CERTIFIÉ

Mme Dominique **LANIEZ**

UFR

Anglais

M. Thierry **WABLE**

UFR

Communication

II – PHARMACIE

PROFESSEURS

M. Thierry BESSON	Chimie Thérapeutique
M. Jean-Jacques BONNET	Pharmacologie
M. Roland CAPRON (PU-PH)	Biophysique
M. Jean COSTENTIN (Professeur émérite)	Pharmacologie
Mme Isabelle DUBUS	Biochimie
M. Loïc FAVENNEC (PU-PH)	Parasitologie
M. Jean Pierre GOULLE	Toxicologie
M. Michel GUERBET	Toxicologie
Mme Isabelle LEROUX-NICOLLET	Physiologie
Mme Christelle MONTEIL	Toxicologie
Mme Martine PESTEL-CARON (PU-PH)	Microbiologie
Mme Elisabeth SEGUIN	Pharmacognosie
M. Rémi VARIN (PU-PH)	Pharmacie clinique
M Jean-Marie VAUGEOIS	Pharmacologie
M. Philippe VERITE	Chimie analytique

MAITRES DE CONFERENCES

Mme Cécile BARBOT	Chimie Générale et Minérale
Mme Dominique BOUCHER	Pharmacologie
M. Frédéric BOUNOURE	Pharmacie Galénique
M. Abdeslam CHAGRAOUI	Physiologie
M. Jean CHASTANG	Biomathématiques
Mme Marie Catherine CONCE-CHEMTOB	Législation pharmaceutique et économie de la santé
Mme Elizabeth CHOSSON	Botanique
Mme Cécile CORBIERE	Biochimie
M. Eric DITTMAR	Biophysique
Mme Nathalie DOURMAP	Pharmacologie

Mme Isabelle DUBUC	Pharmacologie
M. Abdelhakim ELOMRI	Pharmacognosie
M. François ESTOUR	Chimie Organique
M. Gilles GARGALA (MCU-PH)	Parasitologie
Mme Najla GHARBI	Chimie analytique
Mme Marie-Laure GROULT	Botanique
M. Hervé HUE	Biophysique et mathématiques
Mme Laetitia LE GOFF	Parasitologie - Immunologie
Mme Hong LU	Biologie
Mme Sabine MENAGER	Chimie organique
M. Mohamed SKIBA	Pharmacie galénique
Mme Malika SKIBA	Pharmacie galénique
Mme Christine THARASSE	Chimie thérapeutique
M. Frédéric ZIEGLER	Biochimie

PROFESSEURS ASSOCIES

Mme Cécile GUERARD-DETUNCQ	Pharmacie officinale
Mr Jean-François HOUIVET	Pharmacie officinale

PROFESSEUR CERTIFIE

Mme Mathilde GUERIN	Anglais
----------------------------	---------

ATTACHES TEMPORAIRES D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE

M. Romy RAZAKANDRAINIBE	Parasitologie
M. François HALLOUARD	Galénique
Mme Caroline LAUGEL	Chimie organique
M. Souleymane ABDOUL-AZIZE	Biochimie
Mme Maïté NIEPCERON	Microbiologie

LISTE DES RESPONSABLES DES DISCIPLINES PHARMACEUTIQUES

Mme Cécile BARBOT	Chimie Générale et Minérale
M. Thierry BESSON	Chimie thérapeutique
M. Roland CAPRON	Biophysique
M Jean CHASTANG	Mathématiques
Mme Marie-Catherine CONCE-CHEMTOB	Législation et économie de la santé
Mme Elisabeth CHOSSON	Botanique
M. Jean-Jacques BONNET	Pharmacodynamie
Mme Isabelle DUBUS	Biochimie
M. Loïc FAVENNEC	Parasitologie
M. Michel GUERBET	Toxicologie
M. Olivier LAFONT	Chimie organique
Mme Isabelle LEROUX-NICOLLET	Physiologie
Mme Martine PESTEL-CARON	Microbiologie
Mme Elisabeth SEGUIN	Pharmacognosie
M. Mohamed SKIBA	Pharmacie Galénique
M. Philippe VERITE	Chimie analytique

ENSEIGNANTS MONO-APPARTENANTS

PROFESSEURS

Mr Sergueï FETISSOV (med)	Physiologie (ADEN)
Mr Paul MULDER (phar)	Sciences du Médicament
Mme Su RUAN (med)	Génie Informatique

MAITRES DE CONFERENCES

Mr Sahil ADRIOUCH (med)	Biochimie et biologie moléculaire (Unité Inserm 905)
Mme Gaëlle BOUGEARD-DENOYELLE (med)	Biochimie et biologie moléculaire (UMR 1079)
Mme Carine CLEREN (phar)	Neurosciences (Néovasc)
Mme Pascaline GAILDRAT (phar)	Génétique moléculaire humaine (UMR 1079)
Mr Nicolas GUEROUT (phar)	Chirurgie Expérimentale
Mr Antoine OUVRARD-PASCAUD (med)	Physiologie (Unité Inserm 1076)
Mr Frédéric PASQUET	Sciences du langage, orthophonie
Mme Isabelle TOURNIER (phar)	Biochimie (UMR 1079)

CHEF DES SERVICES ADMINISTRATIFS : Mme Véronique DELAFONTAINE

HCN - Hôpital Charles Nicolle

HB - Hôpital de BOIS GUILLAUME

CB - Centre Henri Becquerel

CHS - Centre Hospitalier Spécialisé du Rouvray

CRMPR - Centre Régional de Médecine Physique et de Réadaptation

SJ – Saint Julien Rouen

TABLE DES MATIERES

I.	<u>INTRODUCTION</u>	25
II.	<u>HISTORIQUE</u>	27
	A. Début de la domestication.....	27
	B. Période précolombienne	27
	C. Les conséquences de la conquête espagnole au XVème siècle	29
	D. Les années 1970	30
	E. Le quinoa : un aliment précieux pour l’avenir	32
III.	<u>ETUDE BOTANIQUE</u>	34
	A. Classification et distribution géographique	34
	a. Classification scientifique	34
	b. Classification morphologique.....	35
	c. Ecotypes	36
	1. Le quinoa des zones situées au niveau de la mer	38
	2. Le quinoa des vallées arides (Junín) et des vallées humides (Cajamarca).....	38
	3. Le quinoa des zones tropicales	38
	4. Le quinoa des « Salares ».....	38
	5. Le quinoa des hauts plateaux	39
	B. Morphologie.....	40
	a. Caractères végétatifs.....	40
	1. Les racines.....	40
	2. La tige.....	41
	3. Les ramifications	41
	4. Les feuilles.....	41
	b. Caractère floraux	43
	1. L’inflorescence.....	43
	2. Les fleurs	44
	3. Les fruits et les graines.....	45

C. Résistance de la plante	47
a. Résistance à la sécheresse	48
b. Résistance au froid	48
c. Résistance à la salinité.....	49
d. Résistance aux maladies, parasites et ravageurs	50

IV. <u>COMPOSITION CHIMIQUE ET VALEUR NUTRITIONNELLE DES GRAINES</u>	52
A. Les protéines	53
a. Les protéines de stockage	53
b. Inhibiteurs de protéase	56
c. Lectines.....	57
B. Glucides	57
a. L'amidon.....	57
b. Les fibres alimentaires	59
c. Sucres simples	60
C. Lipides et composés lipidiques	60
D. Minéraux	63
a. Minéraux simples	63
b. Oxalates	65
E. Acide phytique	65
F. Vitamines	67
G. Terpènes et stéroïdes.....	68
a. Squalène et phytostérols	68
b. Saponines	70
c. Phytoecdystéroïdes	74
H. Composés phénoliques	75
a. Acides phénoliques	76
b. Flavonoïdes	77
c. Tanins	79
I. Pigments	79
a. Caroténoïdes	79
b. Bétacyanines	81

V.	<u>PROPRIETES PHARMACOLOGIQUES ET NUTRITION</u>	83
A.	Propriétés pharmacologiques	84
a.	Activité anti-inflammatoire	84
b.	Activité anti-oxydante	85
c.	Activité anti-ulcéreuse	87
d.	Effet sur l'absorption des médicaments	88
e.	Activité molluscicide	89
f.	Activité antifongique	90
B.	Nutrition	91
a.	Gluten-free	91
b.	Effet bénéfique sur le système cardiovasculaire	92
c.	Effet antidiabétique et anti-obésité	94
d.	Fibres alimentaires	95
C.	Anti-nutrition	96
a.	Généralités sur les facteurs antinutritionnels	96
b.	Effet néfaste sur la croissance	97
c.	Effet négatif sur la digestion et l'utilisation des minéraux	98
d.	Effet dépressif sur la digestion et l'utilisation des protéines	100
e.	Effet néfaste sur l'oxalurie	101
e.	Elimination des facteurs antinutritionnels ou annulation de leurs effets	102
D.	Toxicité	104
a.	Potentiel allergisant	104
b.	Activité lytique	105
VI.	<u>CONCLUSION</u>	107

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification scientifique du quinoa

Tableau 2: Exigences de température et d'humidité selon les groupes agro-écologiques du quinoa

Tableau 3: Colorations dans le fruit du quinoa

Tableau 4: Mécanismes de résistance et de tolérance du quinoa à la sécheresse et au froid

Tableau 5: 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)

Tableau 6: Composition lipidique dans la graine de quinoa (en %)

Tableau 7: Comparaison de la composition en acides gras de la fraction lipidique des graines de quinoa, du blé et du maïs (g/100g)

Tableau 8: Comparaison de la teneur moyenne en minéraux du quinoa avec d'autres céréales (mg/100g)

Tableau 9: Comparaison de la teneur en vitamines de la graine de quinoa avec d'autres céréales (µg/g)

Tableau 10: Teneur en squalène et phytostérols dans les graines de quinoa et comparaison avec d'autres céréales et légumineuses (mg/100g)

Tableau 11: Structure chimique des principaux aglycones des saponines du quinoa

Tableau 12: Teneur moyenne en acides phénoliques dans les graines de quinoa (mg/100g)

Tableau 13: Teneur moyenne en flavonoïdes dans les graines de quinoa (mg/100g)

Tableau 14: Comparaison des teneurs totales en caroténoïdes et en caroténoïdes prédominants dans les graines de quinoa et dans une sélection de céréales (µg/g)

Tableau 15: Quelques exemples de teneurs en acide phytique/phytate (en g/100g)

Tableau 16: Concentrations en oxalate d'espèces des familles Amaranthaceae, Polygonaceae et Chenopodiaceae

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Cultures de quinoa sur les plaines de la Cordillères des Andes, produit phare du commerce équitable (Source : <https://www.ird.fr/>)

Figure 2: Slogan de la campagne pour l'année internationale du quinoa
(Source : <http://www.unspecial.org/2013/06/le-quinoa-au-menu/>)

Figure 3: Localisation de la Cordillères des Andes, Amérique du Sud
(Source : http://www.hiboox.fr/go/images/nature-decouverte/cordillere-des-andes-carte_3694fc2391ff8345328259a362fa4ee7.jpg.html)

Figure 4: Système racinaire du quinoa

Figure 5: Variation du nombre de dents dans les feuilles de quinoa

Figure 6: Panicules de quinoa (Source : <https://www.ird.fr/>)

Figure 7: Les formes d'inflorescences du quinoa

Figure 8: Inflorescence amaranthiforme et glomérulaire (Source : <https://www.ird.fr/>)

Figure 9: Fleurs hermaphrodites et femelles du quinoa

Figure 10: *Chenopodium quinoa* – structure interne de la graine_(section médiane longitudinale)

Figure 11: Culture de quinoa au flanc du volcan Tunupa surplombant le salar d'Uyuni
(Source : <https://www.ird.fr/>)

Figure 12: Graines de quinoa (Source : <https://www.ird.fr/>)

Figure 13: Structure de l'acide phytique (Source : <http://www.anatomisk.info/index.html>)

Figure 14: Structure du squalène
(Source : http://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page)

Figure 15: Structure des principaux phytostérols
(Source : http://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page)

Figure 16: 20-hydroxyecdysone et quelques phytoecdystéroïdes

Figure 17: Structure des principaux acides phénoliques

Figure 18: Structure des principaux flavonoïdes

Figure 19: Luténine et zéaxanthine

(Source : <http://www.societechimiquedefrance.fr/>)

Figure 20: Structure des principales bétacyanines

Figure 21: Structure de l'acide 3-O-β-D-glucopyranosyl oléanolique (C₃₆H₅₈O₈)

Figure 22: Structure du 3-O-(β-D-glucopyranosyl)-hédéragénine

Figure 23: Illustration de la complexation des cations polyvalents par l'acide phytique

GLOSSAIRE

Acide abscissique : hormone végétale, produite principalement par les feuilles matures et au niveau du parenchyme des racines. Elle intervient dans la chute des feuilles avant le repos hivernal, dans la chute des fruits mûrs, dans la prolongation de la dormance, dans la fermeture des stomates en cas d'insuffisance hydrique.

Akène : fruit sec, indéhiscent, à graine unique dont le péricarpe, plus ou moins sclérifié, n'est pas soudé à la graine (à la différence du caryopse).

Androcée : ensemble des étamines, formant la partie même des fleurs des Angiospermes.

Angiosperme : le groupe des angiospermes regroupe les plantes à fleurs et dont les graines fécondées sont enfermées dans un fruit, à la différence des gymnospermes dont la graine est à nu. Les angiospermes comprennent les Dicotylédones et les Monocotylédones.

Anthèse : désigne la période terminale du développement de la fleur depuis son épanouissement jusqu'au flétrissement. Durant cette période, les fleurs sont complètement ouvertes et fonctionnelles.

Apex : extrémité d'une racine ou d'une tige

Carpelle : organe femelle d'une fleur constituée d'un style, d'un stigmate et d'un ovaire. Il se transforme en fruit après la fécondation.

Chlorotique : relatif à une chlorose, disparition de la chlorophylle de plantes.

Collet : partie de la plante comprise entre la tige et les racines.

Cotylédon : les cotylédons désignent les feuilles primordiales constitutives de la graine.

Dormance : période pendant laquelle le cycle de vie d'un organisme, la croissance ou le développement sont temporairement arrêtés.

Endosperme : tissu végétal de réserves nutritives.

Episperme : tégument protecteur qui recouvre la graine.

Étamine : organe mâle d'une fleur, porté par le réceptacle floral et situé entre la corolle et le pistil. L'étamine comporte une partie allongée et grêle, le filet, surmontée par un élément renflé, l'anthere, qui est le lieu de production des grains de pollen. L'ensemble des étamines constitue l'androcée.

Funicule : filament reliant l'ovule au placenta de l'ovaire.

Gynécée ou **Pistil** : ensemble des carpelles, libres ou soudées, constituant la partie femelle de la fleur.

Halophyte : désigne une plante capable de s'adapter aux milieux salés.

Hermaphrodite : qualifie une fleur ou une plante entière présentant conjointement les deux sexes, mâle et femelle. Une plante portant à la fois des fleurs mâles et femelles est dite monoïque.

Hile : cicatrice que porte une graine au point où elle était attachée à la plante dont elle est issue. Il correspond au point d'insertion du funicule sur l'ovule.

Jachère : terme ayant changé de sens au fil du temps, désigne ici une période de repos de la terre entre deux cultures.

Limbe : partie principale, plate et élargie de la feuille prolongeant le pétiole, siège principal de la photosynthèse, de la respiration et de la transpiration du végétal.

Micropyle : chez les plantes à graines, correspond à une ouverture dans le tégument de la graine, par laquelle le tube pollinique pénètre jusqu'au nucelle.

Mycélium : ensemble des filaments plus ou moins ramifiés formant la partie végétative d'un champignon.

Ovaire : partie creuse, basale, d'un carpelle contenant le ou les ovules et se transformant en fruit, après la fécondation, chez les angiospermes.

Ovule : organe contenu dans l'ovaire renfermant le gamète femelle et qui donnera la graine après fécondation par le pollen.

Panicule : inflorescence composée, formée par une grappe de grappes sur un axe simple, souvent des inflorescences souples, lâches et retombantes, inflorescence composée dont les rameaux secondaires diminuent de taille de la base au sommet.

Pédicelle : ramification du pédoncule supportant directement la fleur ou pédoncule très court.

Pédoncule : pièce florale en forme de tige qui porte les fleurs puis les fruits après fécondation. Une fleur sans pédoncule, ou à pédoncule très court, est dite sessile.

Péricarpe : paroi du fruit enveloppant la graine, comprend l'épicarpe (peau ou écorce), le mésocarpe (chair ou pulpe, parfois comestible) et l'endocarpe (paroi du noyau par exemple).

Périgone : qualifie un périanthe formé de tépales, ou dit autrement, l'ensemble des tépales indifférenciés d'une fleur est appelé périgone.

Périsperme : tissu de certaines graines issu du développement du nucelle de l'ovaire et chargé de réserves, fournit à l'embryon les substances nécessaires à son développement.

Pétiole : partie étroite de la feuille unissant le limbe à la tige. Les feuilles dépourvues de pétiole sont dites sessiles.

Phylogénétique : désigne un système de classification des êtres vivants qui rend compte des degrés de parenté entre les espèces.

Placenta : partie de la paroi des ovaires portant les ovules.

Radicule : forme embryonnaire de la racine principale d'une plante.

Saponification : réaction chimique transformant un corps gras en savon par hydrolyse alcaline.

Stigmate : extrémité glanduleuse du style ou partie apicale du pistil permettant la réception des grains de pollen.

Taxonomie : science qui étudie la classification des êtres vivants dans différentes catégories, selon des règles strictes qui tiennent compte des caractéristiques physiques et génétiques.

ABBREVIATIONS

20-HE : 20-hydroxyecdysone

ABA : Acide abscissique

FAO : Food and Agriculture Organisation (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture)

HPLC : Chromatographie Liquide Haute Performance

ILSI : International Life Sciences Institute

LPS : lipopolysaccharide

NO : oxyde nitrique

ONU : Organisation des Nations Unies

TNF : Facteur de Nécrose Tumoral

WHO / OMS : World Health Organization / Organisation Mondiale de la Santé

I. 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 ».

Historiquement, le quinoa représentait un aliment de base pour les populations précolombiennes qui en consommaient à la fois les feuilles et les graines. Les Incas, conscients de la qualité nutritive de la graine et de ses bienfaits sur la santé, l'élevèrent au rang de « graine sacrée ». Le quinoa fut cependant délaissé par les conquistadors lors de l'invasion espagnole au profit du blé ou de l'orge. Sa culture subsista de justesse grâce aux fermes traditionnelles et ne servit alors qu'à la consommation locale. Après une longue période de déclin, la production de quinoa connaît un essor fulgurant dans les années 1970, permettant ainsi son exportation dans le Monde, en particulier vers l'Europe qui « redécouvre » cette graine oubliée. Le quinoa suscite alors 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.

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. Par ailleurs, ne contenant pas de gluten, et pouvant donc être consommé par les personnes allergiques à cette protéine, 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 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.

Alors que le Monde doit relever le défi d'accroître la production d'aliments de qualité pour nourrir une population croissante dans un contexte de changements climatiques, le quinoa constitue une source de nourriture alternative et représente un allié dans la lutte contre la faim et la malnutrition. Conscients de cette réalité, l'Assemblée générale de l'ONU déclare 2013 « Année Internationale du quinoa » afin d'améliorer l'accès et la prise de conscience de la valeur du quinoa, mais surtout de stimuler le développement de cette culture sur toute la planète. Ce programme rend hommage au savoir des peuples andins qui ont su sauvegarder et préserver le quinoa comme aliment pour les générations présentes et futures.

Nous proposons dans ce travail d'exposer les aspects botaniques et les différentes étapes de la redécouverte de cette culture ancestrale ; mais surtout de procéder à un examen actualisé complet de la composition chimique et de la valeur nutritionnelle des graines de quinoa. Nous répertorions également les principales propriétés pharmacologiques et nutritionnelles des composés bioactifs et étudierons les effets des substances antinutritionnelles tout en discutant des différents moyens mis en œuvre pour les éliminer.

II. HISTORIQUE

A. Début de la domestication

Le quinoa est une culture indigène originaire de la région andine de l'Amérique du Sud, et plus précisément des alentours du lac Titicaca. Cette zone située entre le Pérou et la Bolivie constitue un ancien centre de civilisation et de domestication des cultures. En référence à son origine ancestrale, le quinoa est parfois surnommé « graine des Incas », une expression assez mal choisie car la domestication du quinoa ne date pas de l'époque où l'Empire Inca était à son apogée.

D'après les témoignages historiques, le quinoa aurait été domestiqué il y a plus de 7000 ans par les peuples andins. Les plus anciens vestiges de quinoa ont été retrouvés à Ayacucho au Pérou et dataient de plus de 5000 ans avant J.-C., d'autres provenant de Chinchorro dans le Nord du Chili dataient de 3000 avant J.-C, et enfin des traces ont été découvertes en Bolivie datant de 750 avant J.-C. (Galwey *et al.*, 1990). D'autres preuves archéologiques, consistant en des graines et des inflorescences de quinoa, ont été trouvées dans des tombes indigènes à Tarapacá, Calama et Arica au Chili, ainsi que dans différentes régions du Pérou. Des graines ont également été retrouvées en quantité abondante dans des sépultures indigènes à Tiltil et Quillaga au Chili (Tapia *et al.*, 1979).

B. Période précolombienne

Le quinoa constituait une source d'alimentation importante pour les populations précolombiennes dans les hauts plateaux de la Cordillère des Andes, en particulier pour les Incas qui le cultivèrent tout au long de leur Empire. Mais le quinoa était également cultivé par les Indiens araucans (ou les Mapuches) de l'Argentine et du Chili, et par les Indiens Chibcha du Nord de la Colombie, des civilisations jamais conquises par les Incas (Tapia *et al.*, 1979 ; National Research Council, 1989). Aujourd'hui, sa culture constitue encore une agriculture vivrière essentielle pour les peuples Quechua (Pérou) et Aymara (Bolivie) des régions rurales.

Les limites exactes de la répartition du quinoa sont inconnues (Wilson, 1990), mais pendant la période pré-Inca et Inca, il a été établi comme ayant été largement cultivé de Bogota en Colombie (5°N) vers le Sud à travers le Pérou et la Bolivie jusqu'à l'île de Chiloe

au Chili (42°S) et au Sud-Est de Córdoba en Argentine, du niveau de la mer jusqu'à des altitudes d'environ 3800 mètres (Tapia *et al.*, 1979).

Les peuples andins utilisaient la plante entière pour ses applications alimentaires et médicinales. Les graines constituaient l'aliment de base, elles étaient traditionnellement grillées puis transformées en farine pour la préparation de différents types de pains. Elles pouvaient aussi être cuites, ajoutées aux soupes, cuisinées comme des céréales, ou sous forme de pâtes (Bhargava *et al.*, 2006). Elles étaient même fermentées pour en faire de la bière ou de la « chicha », une boisson alcoolisée de cérémonie en Amérique du Sud (FAO, 2011). Les feuilles étaient consommées de façon similaire aux épinards, cuites ou crues en salade (Oelke *et al.*, 1992).

Concernant ses propriétés médicinales, les archives indiquent une grande variété d'utilisations de la plante, du traitement des plaies et des fractures à celui des problèmes digestifs. Il a également été largement considéré comme tonique (FAO, 2011). Par exemple, les cendres des tiges séchées, appelées « llipta », étaient mélangées avec des feuilles de coca et mâchées par les agriculteurs andins pour leur effet énergisant (Martindale, 1894). De même, des mélanges de quinoa et de graisse, dites « boules de guerre », ont été utilisés pour soutenir les armées incas alors qu'ils marchaient sur la Cordillère des Andes (Small, 2013).

Le quinoa était un aliment si vital pour les Incas et un tel soutien pour la communauté qu'il était honoré et considéré comme sacré. Les graines représentaient la principale source de protéines pour ce peuple au régime presque exclusivement végétarien. Conscients de ses qualités nutritives et agricoles exceptionnelles, les Incas l'appelaient « chisiya mama » dans leur langue maternelle, le Quechua, qui signifie « mère de toutes les graines ». Les semences et la moisson étaient transformées en fêtes religieuses et la légende dit que chaque année, l'empereur Inca battait le sol avec une pelle en or et plantait la première graine (Risi et Galwey, 1984 ; National Research Council, 1989). La découverte d'un khipu (signifie « nœud » et « compte » en quechua) du 16^{ème} siècle, un assemblage de cordelettes nouées qui servaient à tenir les comptes, a confirmé l'importance de la production du quinoa dans les hauts plateaux du Pérou, où elle y précédait celle de la pomme de terre (Tapia *et al.*, 1979).

C. Les conséquences de la conquête espagnole au XV^{ème} siècle

Au moment de la conquête espagnole de l'Amérique du Sud, l'Empire Inca était marqué par la nature prolifique de son agriculture : les principales cultures précolombiennes étaient le maïs, les pommes de terre et le quinoa (Hunziker, 1952). On pense que les Incas cultivaient autant d'espèces que les agriculteurs de toute l'Asie et de l'Europe réunis. Il a été estimé que les Indiens andins avaient domestiqué pas moins de 70 espèces, incluant des racines, des céréales, des légumineuses et des fruits (Fleming et Galwey, 1995). Les premiers rapports déclarant la culture de « quinoa » dans ce nouveau monde commencèrent alors à inonder l'Europe. Ils mentionnaient par exemple l'extraordinaire adaptation de cette plante aux terres de hautes altitudes et l'aspect de ses graines, similaire au mil ou au riz à grains courts (Tapia *et al.*, 1979).

Cependant, les conquistadors n'apprécièrent pas le quinoa, possiblement à cause de la teneur trop élevée en saponines dans la coque des graines qui leur donnait un goût amer et nécessitait qu'elles soient traitées avant d'être consommées. De plus, ils ne croyaient pas en sa valeur nutritive et n'appréciaient pas le fait que la farine que l'on pouvait en tirer ne permette pas de faire du pain de qualité. C'est pourquoi, contrairement à la pomme de terre ou au maïs qu'ils adoptèrent sans difficultés, les Espagnols interdirent la culture du quinoa et détruisirent une grande partie du système agricole mis en place. Le quinoa fut alors délaissé et remplacé par des espèces européennes comme le blé ou l'orge qui s'adaptèrent très bien aux plaines andines. On suppose également que l'introduction de bovins et d'ovins fournissant une nouvelle source de protéines rendit le quinoa moins essentiel (Cardozo et Tapia, 1979 ; Galwey *et al.*, 1990).

De telles mesures semblaient être une stratégie délibérée de la part des Espagnols qui croyaient que le quinoa était une source de force et de résilience pour les Incas. Ils qualifiaient le quinoa de « nourriture pour Indiens », et donc indigne de tout bon chrétien. L'éradication de cette culture était un moyen d'ébranler la religion des Incas et de discréditer leurs pratiques et leurs traditions culturelles (Cusack, 1984 ; Fleming et Galwey, 1995).

Néanmoins, le déclin du quinoa ne peut pas entièrement être attribué aux préjugés et aux efforts des conquistadors pour l'évincer. En effet, un rapport fait état de la tentative des Espagnols d'introduire le quinoa dans l'Ancien Monde. Mais le mauvais œil entourait cette graine pourtant si prometteuse puisque lors de la première expédition vers l'Europe, les

graines arrivèrent mortes à destination. Il est probable que la forte humidité régnant durant la traversée ait dégradé les graines, mais il fut déclaré qu'elles ne pouvaient être cultivées (Tapia *et al.*, 1979).

Malgré l'ordre des colons, quelques petites plantations de quinoa réussirent à subsister dans des endroits reculés de la Cordillère des Andes, le quinoa devint la culture majoritaire de ces régions montagneuses du fait de sa tolérance à la sécheresse, au froid et aux sols pauvres (Rea *et al.*, 1979). Il ne servait alors qu'à la consommation domestique des fermiers dans les zones rurales, ou bien de « plante frontalière » pour d'autres cultures comme les pommes de terre ou le maïs. C'est pour cette raison que le quinoa commença à souffrir d'une réputation de « nourriture pour les pauvres » (Valencia-Chamorro, 2003). Cette culture fut ainsi menacé de disparaître à jamais pendant quatre siècles, jusqu'à sa « redécouverte » dans les années 70.

D. Les années 1970

Le quinoa connut une longue période de production et de consommation marginalisée qui se poursuivit jusqu'au 20^{ème} siècle. Le déclin de la culture fut marqué, entre autres, par une baisse des surfaces de production. Au Pérou, par exemple, l'aire de culture du quinoa diminua de plus des deux tiers en passant de 47000 à 15000 hectares entre 1947 et 1975.

Toutefois, à cette époque, la tendance s'inverse au Pérou ainsi qu'en Bolivie (Figure 1), où l'on commence à réaliser le potentiel nutritionnel et agronomique de cette culture et à exploiter sa polyvalence (Risi et Galwey, 1984). Le quinoa n'est alors plus seulement cultivé pour la consommation domestique mais également pour l'exportation dans le monde entier où la demande évolue de façon croissante. A ce moment-là, les principaux domaines de production se trouvent en Colombie, au Chili, dans les vallées andines au Pérou, sur les hautes terres de l'Equateur et sur l'Altiplano en Bolivie et au Pérou, où cette culture n'a cessé de prendre de l'importance.

Il aura donc fallu attendre la fin des années 1970 pour que le monde redécouvre cette culture tombée dans l'oubli. A cette époque, les mentalités changent et la tendance est à la modification des habitudes alimentaires vers une nourriture plus saine. Si la plante étonne par ses qualités agronomiques qui lui permettent de résister à des conditions climatiques défavorables, elle intéresse surtout pour ses nombreuses qualités nutritionnelles, comme une haute teneur en protéines et une excellente balance en acides aminés essentiels. Ces dernières

années, le quinoa a d'ailleurs fait l'objet de nombreuses études qui valident sa valeur alimentaire. D'abord cantonné à de petits magasins d'importation, le quinoa a finalement trouvé sa place dans la grande distribution des pays industrialisés grâce au développement du commerce équitable.

Figure 1: Cultures de quinoa sur les plaines de la Cordillère des Andes, produit phare du commerce équitable (IRD)



Un grand nombre de recherches a récemment émergé sur les composés chimiques bioactifs du quinoa et leurs propriétés thérapeutiques. Les résultats de ces investigations tendent à représenter le quinoa comme un aliment susceptible de contribuer à la réduction du risque de diverses maladies. Ainsi, le quinoa est depuis peu désigné comme « aliment fonctionnel », une notion définie pour la première fois en 1984 qui qualifie les produits alimentaires faisant partie de l'alimentation normale et apportant des effets bénéfiques spécifiques pour la santé, au-delà de leurs fonctions nutritionnelles de base. Ce concept est à distinguer de celui de « produit nutraceutique » qui désigne plutôt un produit fabriqué à partir d'aliments, vendu sous forme de pilules, de poudres ou d'autres formes médicinales, et qui s'est avéré avoir un effet physiologique bénéfique ou assurer une protection contre les maladies chroniques. Le quinoa, en plus des seuls bienfaits permis par sa consommation tel quel, pourrait à l'avenir servir à l'élaboration de tels produits.

E. Le quinoa : un aliment précieux pour l'avenir

De nos jours, la santé humaine et la sécurité alimentaire sont devenues des préoccupations mondiales de plus en plus importantes. Au cours des prochaines années, les écosystèmes devraient connaître des bouleversements climatiques tels qu'ils mettront en danger la production alimentaire fiable (Perez *et al.*, 2010). D'ici 2050, la population mondiale devrait augmenter à plus de 9 milliards, augmentant ainsi la demande alimentaire entre 70 et 100% (Tilman *et al.*, 2002 ; Godfray *et al.*, 2010).

Aujourd'hui, environ 1 individu sur 8 souffre déjà de sous-alimentation chronique (FAO, IFAD, WFP, 2014), tandis que le diabète, l'obésité et autres troubles métaboliques ont atteint des proportions épidémiques mondiales (Nguyen et Lau, 2012 ; Zimmet *et al.*, 2014). En outre, l'âge médian de la population devrait également connaître une hausse progressive (31,1 prévu en 2050 contre 26,6 en 2000 (Lutz *et al.*, 2008), entraînant vraisemblablement une augmentation de la prévalence des troubles liés à l'âge comme les maladies cardiovasculaires.

Dans ce contexte, l'alimentation apparaît comme une solution abordable pour lutter contre la faim, la malnutrition et la dégradation de la santé humaine. Afin de promouvoir la capacité du quinoa à améliorer les moyens d'existence des diverses communautés à travers le monde, l'amélioration de l'accès et la prise de conscience de la valeur du quinoa pour la santé sont déterminantes.

Encore limitée à certaines zones, la production de quinoa n'est pas en mesure de répondre à la demande croissante du monde entier. Une des stratégies est l'expansion de la culture du quinoa dans les autres continents, en particulier les régions d'Afrique et d'Asie où la production alimentaire est menacée par le changement climatique et la désertification. Une deuxième stratégie consiste en la diffusion des informations concernant la valeur du quinoa sur la santé, les utilisations, la biodiversité et les méthodes de culture durables (Graf *et al.*, 2015b).

Conscient de ces besoins, l'Assemblée générale des Nations Unies proclame 2013 « Année Internationale du quinoa » (Figure 2) en l'honneur des peuples andins qui ont su, par leur savoir-faire et leur mode de vie en harmonie avec la nature, sauvegarder et préserver cet aliment pour les générations présentes et futures (FAO, 2012, 2014). En faisant la promotion de ses qualités nutritionnelles, de ses bienfaits pour la santé et de sa capacité d'adaptation aux

variations climatiques, l'ONU espère attirer l'attention du monde entier sur le rôle que pourrait jouer le quinoa dans la lutte contre la faim et l'insécurité alimentaire.

Figure 2: Slogan de la campagne pour l'année internationale du quinoa



III. ETUDE BOTANIQUE

A. Classification et distribution géographique

a. 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	

Les Chenopodiaceae constituent une grande famille qui comprend environ 1500 espèces réparties dans une centaine de genres, poussant dans les régions tempérées et subtropicales du monde entier. Il s'agit principalement de plantes herbacées vivaces ou annuelles, plus rarement d'arbres et d'arbustes, qui sont généralement halophytes ; c'est-à-dire qu'ils ont la particularité de s'adapter aux milieux salés par divers mécanismes. Les Chenopodiaceae regroupent des espèces d'usage industriel, horticoles, fourragères et alimentaires, en plus des spécimens préjudiciables pour les cultures (mauvaises herbes).

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* L.).

Le nom botanique complet du quinoa, *Chenopodium quinoa* Willd., inclut l'abréviation de l'auteur correspondant à Carl Ludwig von Willdenow (1765-1812). On doit à ce botaniste et pharmacien allemand l'étude de nombreuses plantes, dont le quinoa qu'il décrit le premier en 1797 dans son *Species plantarum* en indiquant qu'il s'agissait d'une espèce originaire d'Amérique du Sud. Cette notion fut ensuite précisée en situant son centre d'origine dans les Andes péruviennes et boliviennes, autour du Lac Titicaca.

Selon la langue ou la localité, on répertorie plusieurs noms communs utilisés dans la région andine tels que : quinua, kiuna, parca (*quechua* : Equateur, Pérou, Bolivie) ; supha, jopa, jupha, jiura, aara, ccallapi, vocali (*Aymara* : Bolivie) ; quinhua (*mapuche* : Chili) ; suba (*chibca* : Colombie) (Valencia-Chamorro, 2003 ; National Research Council, 1989) (Figure 3).

b. 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. L'une des premières classifications connues a été réalisée à partir d'échantillons récoltés sur l'altiplano bolivien en 1917. Il était alors décrit quatre espèces de quinoa : *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 ont convenu 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)

c. 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.

Le quinoa est cultivé en Amérique du Sud (en particulier dans et autour des Andes), à des latitudes de 4°N en Colombie jusqu'à 40°S au Chili, à partir du niveau de la mer jusqu'à une altitude de 4000 mètres (Risi et Galwey, 1989). Selon les adaptations développées, environ 3000 variétés de quinoa, sauvages ou cultivées, ont pu être regroupées en cinq catégories ou écotypes (Laguna, 2002 ; Tapia et Fries, 2007).

Figure 3: Localisation de la Cordillère des Andes, Amérique du Sud



1. Le quinoa des zones situées au niveau de la mer

Il provient du sud du Chili, autour de 30°S de latitude, en particulier dans la région de Concepción et de Valdivia. Les plantes poussent dans les régions situées entre le niveau de la mer et 500 mètres d'altitude et sont les mieux adaptées aux conditions humides. Elles sont plus ou moins robustes, de 1 à 1,4 mètres de hauteur, majoritairement non ramifiées, et fleurissent pendant les jours les plus longs. Elles produisent de petites graines plates, jaunes, translucides et riches en saponines.

2. Le quinoa des vallées arides (Junín) et des vallées humides (Cajamarca)

Il provient des vallées andines situées entre 2000 et 3500 mètres d'altitudes (vallées du Sud de la Colombie, l'Equateur, le Pérou et la Bolivie). On peut distinguer deux sous-types : le quinoa issu des cultures irriguées dans les vallées interandines comme à Urubamba (Pérou) et Cochabamba (Bolivie) ; et le quinoa poussant dans des conditions pluviales comme à Huaraz, dans la vallée du Mantaro, Ayacucho et Abancay (Pérou). Les plantes sont hautes, certaines atteignant jusqu'à 3,5 mètres, sont adaptées à des températures comprises en 10 et 18°C et ne résistent pas au gel. La plupart sont ramifiées et produisent des grains de petite taille, contenant peu de saponines.

3. Le quinoa des zones tropicales

Il provient des vallées interandines de la Bolivie, dans la région des Yungas, à des altitudes comprises entre 1500 et 2000 mètres. Leur adaptation au climat subtropical leur permet de supporter des niveaux plus élevés de précipitation et de chaleur. Les plantes sont de couleur intense et leur tige à la particularité de prendre une coloration orangée à l'état mature. Les graines sont petites, blanches ou oranges. Elles présentent une longue période de végétation (saison de croissance) de 200 jours.

4. Le quinoa des « Salares »

Il provient des vastes déserts de sel du sud de l'altiplano bolivien, de la puna du nord du Chili (frontière avec la Bolivie) et du nord-est de l'Argentine, situés à près de 3000 mètres d'altitude. Les plantes peuvent résister à des conditions extrêmes : des températures de -8°C,

des sols alcalins jusqu'à un pH de 8 et une haute salinité. Leur développement initial est rendu possible par la mise à profit de l'humidité des trous creusés au moment des semailles. La culture dans ces régions suit un protocole particulier ; après la récolte le sol reste au repos pendant quatre à huit ans. La diminution de cette période de jachère a des répercussions négatives sur la fertilité des sols. Les graines sont grosses avec une haute teneur en saponines. La variété la plus représentée est Real.

5. Le quinoa des hauts plateaux

Il provient des régions montagneuses autour du Lac Titicaca où les conditions de culture sont variables. Il y a d'une part des conditions de faibles précipitations et de températures favorables aux abords du Lac Titicaca, près des rivières ou des cours d'eau, d'où sont originaires les variétés Kancolla, Blanca de Julí et Tahuaco. D'autre part, les variétés Cheweca, Ccoitu, Wariponcho, Chullpi et Witulla supportent de plus basses températures et s'adaptent aux hautes plaines, entre 3800 et 4100 mètres. Les plantes sont de petite taille (entre 0,5 et 1,5 mètre de hauteur) avec des tiges droites et présentent une courte période de croissance.

Le Tableau 2 indique les valeurs des précipitations et températures minimales moyennes dont ont besoin les différents écotypes du quinoa.

Tableau 2: Exigences de température et d'humidité selon les groupes agro-écologiques du quinoa (Tapia, 1997)

Ecotype	Précipitation (mm)	Température minimale moyenne (°C)
Niveau de la mer	800 - 1500	5
Vallées	700 - 1500	3
Zone subtropicale (Yungas)	1000 - 2000	7
Salares	250 - 400	-1
Altiplano	400 - 800	0

B. Morphologie

a. Caractères végétatifs

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 4).

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 4: Système racinaire du quinoa (Gandarillas, 1979)



La profondeur de la racine est étroitement liée à la hauteur de la plante. Des plantes de 1,70 m avec une racine de 1,50 m et d'autres de 90 cm de hauteur avec une racine de 80 cm ont été référencées (Pacheco et Morlon, 1978). C'est à ce fabuleux système racinaire pivotant, vigoureux, profond, bien ramifié et fibreux que le quinoa doit sa résistance à la sécheresse et sa bonne stabilité.

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. A l'intérieur de la tige, on trouve une moelle de couleur blanche à crème, de texture molle chez les jeunes plants puis devenant aérée et spongieuse à l'approche de la maturité. En revanche, le cortex est ferme et compact, constitué de tissus solides (Gandarillas, 1979).

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).

D'un point de vue commercial, la ramification des plants est indésirable pour la production des graines de quinoa ; c'est pourquoi dans le cadre d'une culture à grande échelle, l'ensemencement est effectué avec une densité ne laissant aucune opportunité aux plants de se ramifier (Jacobsen et Stolen, 1993).

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

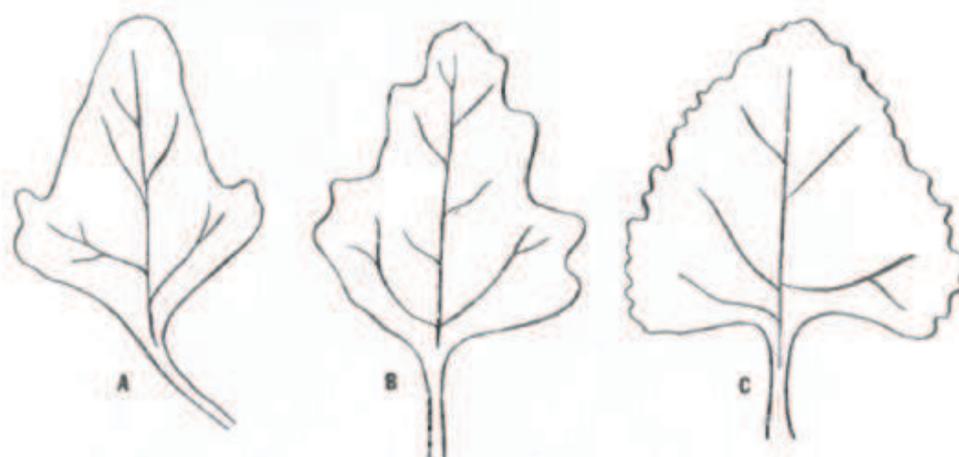
inférieures sont grandes, jusqu'à 15×12 cm, rhomboïdales (en forme de losange) ou triangulaires ; tandis que les feuilles supérieures sont petites, d'environ 10×2 mm, lancéolées ou triangulaires (Mujica *et al.*, 2001).

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).

L'un des caractères les plus constants est le nombre de dentelures qui bordent les feuilles qui varie de 0 à 20 selon les différents écotypes (Gandarillas, 1968b) (Figure 5).

Les feuilles présentent des adaptations morphologiques variées qui les aident à résister à la sécheresse pendant la croissance, parmi lesquelles une cuticule cireuse, des stomates protégés par un épiderme épaissi et des papilles sur les deux faces (Jacobsen et Stolen, 1993). Ces papilles, grâce à leur forte teneur en oxalate de calcium, fonctionnent comme des agents hygroscopiques. Cela signifie qu'elles sont capables de capter l'humidité atmosphérique nocturne, de contrôler l'évapotranspiration excessive mais également de réfléchir les rayons solaires, empêchant ainsi le phénomène de réchauffement des feuilles (Mujica *et al.*, 2001).

Figure 5: Variation du nombre de dents dans les feuilles de quinoa (Gandarillas, 1979)



- A) race du sud du Pérou et de la Bolivie avec peu de dents ;
- B) race du centre du Pérou avec 3 à 12 dents ;
- C) race du nord du Pérou et de l'Equateur avec plus de 12 dents.

b. Caractère floraux

1. L'inflorescence

L'inflorescence est une panicule typique (Figure 6), c'est-à-dire une inflorescence composée d'un axe principal d'où émergent des axes secondaires et tertiaires (Risi et Galwey, 1984).

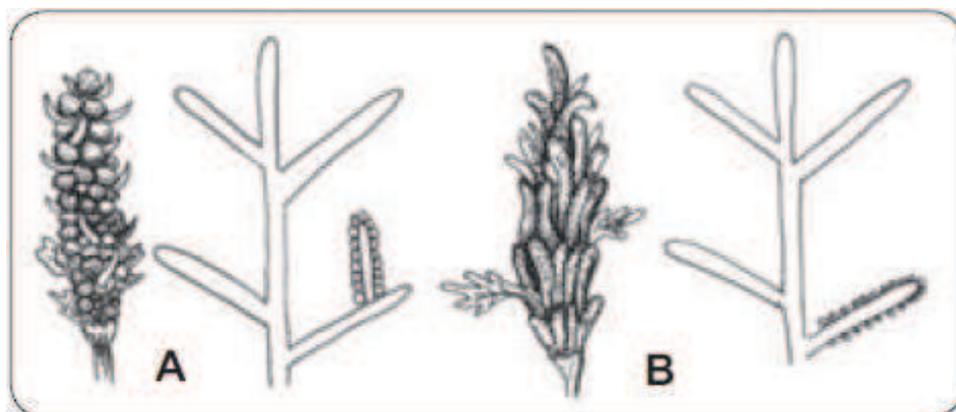
Figure 6: Panicules de quinoa (IRD)



Il a été décrit deux types d'inflorescences chez le quinoa : glomérulaire et amaranthiforme (Figure 7).

Figure 7: Les formes d'inflorescences du quinoa

A) glomérulaire ; B) amaranthiforme (Tapia et Fries, 2007)



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 8).

Figure 8: Inflorescence amaranthiforme et glomérulaire (IRD)

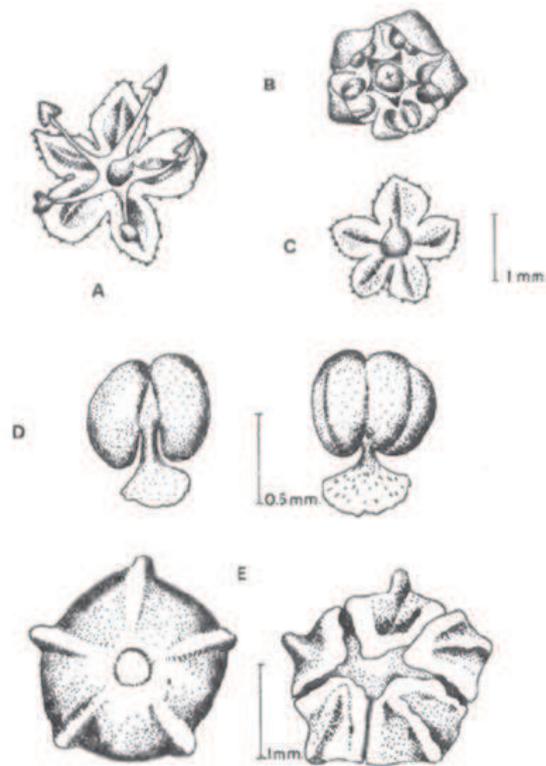


La longueur de la panicule varie selon la variété, l'environnement et les conditions de fertilité du sol. Elle peut atteindre 30 à 80 cm de long pour 5 à 30 cm de diamètre. Le nombre de glomérules par panicule varie entre 80 et 120 et le nombre de graines par panicule entre 1000 et 3000. On peut trouver de grandes panicules qui produisent jusqu'à 500 grammes de graines par inflorescence (Mujica *et al.*, 2001).

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) (Figure 9).

Figure 9: Fleurs hermaphrodites et femelles du quinoa (Gandarillas, 1979)



- A) Fleur hermaphrodite en période d’anthèse ; B) Fleur hermaphrodite avant l’anthèse ;
C) Fleur femelle ; D) Etamine avant la déhiscence, vue interne et externe, respectivement ;
E) Fruit recouvert par le périgone, vue ventrale et dorsale, respectivement

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 entourées 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 la glomérule dépend de la variété (Gandarillas, 1979).

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 péricarpe, du péricarpe et de l'épisperme (Tableau 3) sont la raison pour laquelle l'inflorescence du quinoa présente autant de couleurs variées (Gandarillas, 1979).

Tableau 3: Colorations dans le fruit du quinoa

Péricarpe	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 péricarpe 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).

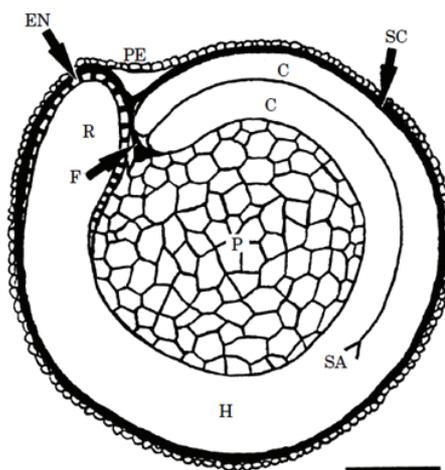
Le péricarpe du fruit adhère à la graine et est éliminé par décorticage abrasif avant la consommation. Juste en dessous du péricarpe, l'épisperme entoure la graine en formant une membrane très mince.

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 (Gallardo *et al.*, 1997) (Figure 10). 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.

Figure 10: *Chenopodium quinoa* – structure interne de la graine
(section médiane longitudinale) (Prego *et al.*, 1998)



Le péricarpe (PE) entoure la graine. L'embryon consiste en un axe hypocotyle-radicule (H) et deux cotylédons (C). L'endosperme (EN) est présent dans la région micropylaire.

(F): Funicule ; (P): Périsperme ; (PE): Péricarpe ; (R): Radicule ; (SA): Apex ;

Echelle = 500 µm

C. Résistance de la plante

Le quinoa est une plante originaire de la région andine de l'Amérique du Sud, cultivée depuis le niveau de la mer au Chili jusqu'à près de 4000 m d'altitude sur l'Altiplano boliviano-péruvien où la qualité du sol est pauvre et les conditions climatiques particulièrement difficiles. Cette large distribution géographique témoigne de la grande faculté d'adaptation de cette espèce qui a dû développer divers mécanismes de défense afin de résister à la sécheresse fréquente, au gel, à la grêle, au vent, au sel ; mais aussi aux différentes maladies, parasites et ravageurs s'attaquant aux cultures.

a. Résistance à la sécheresse

Le quinoa est une plante hautement résistante à la sécheresse puisqu'elle tolère des températures élevées allant jusqu'à 35°C et présente de faibles besoins en eau (Oelke *et al.*, 1992). Toutefois, la sécheresse a plusieurs conséquences sur la plante et l'effet ne sera pas le même selon l'intensité et la durée de l'épisode sec, mais aussi le stade de développement durant lequel elle se produit, le génotype de la plante ou le fait qu'elle ait déjà souffert de sécheresse à un stade précédent, ou encore les caractéristiques du sol et la tolérance de la plante au déficit hydrique (Mujica *et al.*, 2001).

La plante est capable de croître dans les régions où la pluviométrie annuelle est de l'ordre de 200 à 400 mm (Valencia-Chamorro, 2003) ; et certains écotypes ont même montré qu'ils pouvaient atteindre la maturité dans des conditions d'irrigation équivalente à seulement 50 mm de précipitation par saison, ce qui est une irrigation extrêmement faible pour toutes les espèces de cultures (Martínez *et al.*, 2009). Le quinoa a ainsi développé différents mécanismes de résistance au stress hydrique (Tableau 4). (Mujica *et al.*, 2001). Malgré cela, la sécheresse reste l'un des facteurs de baisse de rendement en graines, même si des sécheresses modérées en début de cycle peuvent avoir un effet positif d'endurcissement des plants (Bosque *et al.*, 2003).

b. Résistance au froid

Il existe plusieurs cultivars de quinoa qui se sont adaptés aux basses températures (Mujica *et al.*, 2001). L'effet du gel sur la plante diffère selon son intensité et sa durée, mais aussi selon les phases de développement où il se produit, l'humidité relative de l'air et le génotype. En effet, s'il est généralement admis que la température minimale limite de croissance pour le quinoa est de -5°C (Bois *et al.*, 2006) ; certaines variétés toléreraient jusqu'à -18°C durant les premiers stades de croissance (Catacora et Canahua, 1992).

Une fois encore, le quinoa a mis en œuvre divers moyens pour survivre au gel (Tableau 4), le principal consistant à éviter la formation de glace par surfusion modérée. En fait, le quinoa présente une teneur élevée en sucres solubles, ce qui peut provoquer une diminution du point de congélation, et donc contribue à abaisser la température létale du tissu des feuilles (Jacobsen *et al.*, 2007). Il a alors été suggéré que le niveau de sucres solubles pourrait être utilisé comme un indicateur de la résistance au gel (Jacobsen *et al.*, 2005).

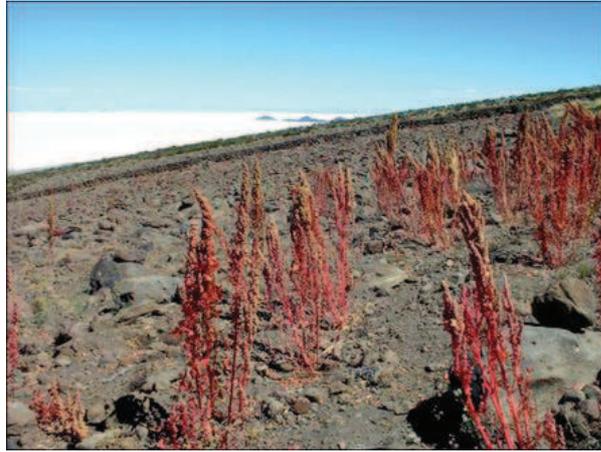
Tableau 4: Mécanismes de résistance et de tolérance du quinoa à la sécheresse et au froid (d'après Mujica *et al.*, 2001)

Sécheresse	Fr
<ul style="list-style-type: none"> - Chute des feuilles ou feuilles plus petites et moins nombreuses pour réduire la surface foliaire et la transpiration - Réduction de la taille de la plante - Forte concentration de cristaux d'oxalate de calcium sur les feuilles autour des stomates pour réfléchir le rayonnement solaire et favoriser la rétention de l'humidité atmosphérique - Enroulement des feuilles sur la panicule - Plus grande résistance stomatique - Rôle photosynthétique possible de la panicule et des tiges après la chute des feuilles - Récupération rapide après une période de sécheresse - Changements de position des feuilles et de la courbure de la tige entre le jour et la nuit - Faible taux de transpiration - Plus grande vitesse d'absorption d'eau - Elasticité de la membrane cellulaire - Meilleure résistance après un pré-conditionnement (endurcissement par les stress antérieurs) - Système racinaire plus profond et plus dense - Stomates moins nombreux et plus petits 	<ul style="list-style-type: none"> - Chute de feuilles ou feu - Réduction de la taille d - Changements de positic - courbure de la tige entre l - Osmorégulation pour ré - glace dans l'espace apopl - Stomates moins nombre - Rallongement des phases plus tolérantes au froid - Accumulation de métab - proline et protéines)

c. Résistance à la salinité

Les variétés de quinoa cultivées dans la zone située entre les salars boliviens (Figure 11) ont acquis une étonnante capacité à se développer dans ce milieu où les sols et les eaux d'irrigation peuvent avoir des concentrations en sel non négligeables. Il semble que les plus tolérantes d'entre elles puissent faire face à des niveaux de salinité aussi élevés que ceux présents dans l'eau de mer (Jacobsen *et al.*, 2001, 2003 ; Koyro et Eisa, 2008 ; Hariadi *et al.*, 2011).

Figure 11: Culture de quinoa au flanc du volcan Tunupa surplombant le salar d'Uyuni (IRD)



On dit de cette plante qu'elle est un halophyte facultatif, c'est-à-dire qu'elle peut vivre en milieu salé comme en milieu d'eau douce. Elle est capable d'accumuler des ions salins dans ses tissus afin d'ajuster le potentiel hydrique des feuilles. Cela lui permet de maintenir la turgescence cellulaire et de limiter la transpiration dans des conditions salines, évitant ainsi les dommages physiologiques d'un épisode de sécheresse (Jacobsen *et al.*, 2001).

Les principaux traits relatifs à la tolérance au sel sont les suivants (Adolf *et al.*, 2013) :

- Un contrôle efficace de l'accumulation de sodium dans le xylème (tissu vasculaire conduisant de l'eau et des nutriments dissous de la racine vers le sommet de la plante, contribuant également à former l'élément ligneux dans la tige) et de la séquestration de sodium dans les vacuoles des feuilles,
- Une plus haute tolérance aux espèces réactives de l'oxygène (molécules de signalisation clés produites en réponse à un stress et déclenchant une variété de réponses de défense des plantes),
- Une meilleure rétention du potassium,
- Et un système de contrôle efficace du développement et de l'ouverture des stomates.

d. Résistance aux maladies, parasites et ravageurs

De toutes les maladies connues pour s'attaquer aux plants de quinoa, la plus dommageable est le mildiou, une maladie causée par un champignon appelé *Peronospora farinosa*. Elle est caractérisée par la présence de lésions chlorotiques sur les surfaces supérieures des feuilles, avec un mycélium blanc ou pourpre sur les surfaces inférieures

(Valencia-Chamorro, 2003). Signalé dans tous les domaines de culture du quinoa, le mildiou est considéré comme endémique dans les hauts plateaux andins et constitue une contrainte importante à la production du quinoa puisqu'il entraîne une baisse de rendement significative.

D'autres maladies fongiques ont été signalées de manière plus sporadique, avec par exemple la fonte des semis (*Rhizoctonia*), la fusariose (*Fusarium*), la pourriture des semences et la fonte des semis (*Sclerotium rolfsii*, *Pythium zingiberum*), les tâches foliaires (*Ascochyta hyalospora*) ou encore la pourriture brune de la tige (*Phoma exigua* var. *Foveata*) (Danielsen *et al.*, 2003).

Le kcona kcona (*Scrobipalpula* sp.), petit insecte de l'ordre des lépidoptères (papillons), est probablement le ravageur le plus grave du quinoa. Lorsque les périodes de sécheresse et des températures élevées sont présents, les insectes attaquent intensément. Les larves détruisent d'abord les feuilles et l'inflorescence. Plus tard, lorsque les plantes sont mures, les larves détruisent la panicule et les graines (Valencia-Chamorro, 2003).

Quant aux oiseaux et aux parasites, les graines de quinoa contiennent une forte teneur en saponine, un composant qui les rend moins sensibles à ces attaques grâce à son goût amer et à sa toxicité pour les animaux de petite taille (Tapia, 2000).

IV. COMPOSITION CHIMIQUE ET VALEUR NUTRITIONNELLE DES GRAINES

Les graines de quinoa constituent l'aliment de base des peuples andins d'Amérique du Sud depuis plusieurs milliers d'années (Figure 12). 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 (autrefois placé dans celle des Chenopodiaceae), le quinoa produit des graines dicotylédones qui se distinguent morphologiquement des grains de céréales.

Figure 12: Graines de quinoa (IRD)



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 ces 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.

A. Les protéines

a. 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 globuloïdes, 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 ; Dini *et al.*, 1992 ; Chauhan *et al.*, 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 (*Oryza 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 5), c'est-à-dire ceux que le corps ne peut synthétiser lui-même et nécessitant donc d'être fournis par le régime alimentaire.

Tableau 5: 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)

	Quinoa ⁽¹⁾	Blé ⁽²⁾	Orge ⁽²⁾	Riz ⁽²⁾	Maïs ⁽²⁾	Haricot ⁽²⁾
Essentiels						
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
Semi-Essentiels						
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⁾ USDA, 2005

⁽²⁾ USDA, 2015

La balance en acides aminés des protéines du quinoa est excellente et s'explique par la nature de ces protéines de stockage, les albumines et les globulines, dont la composition en acides aminés diffère significativement de celle des prolamines des céréales communes. Elles contiennent moins d'acide glutamique et de proline mais d'avantage d'acides aminés essentiels comme la lysine (acide aminé limitant dans la plupart des céréales), la méthionine (acide aminé soufré limitant dans les légumineuses), la cystine et l'histidine.

En plus d'un spectre d'acides aminés plus large que les céréales et les légumineuses (Abugoch *et al.*, 2008), le quinoa présente des teneurs intéressantes en acides aminés dits « semi-essentiels ». Il contient, par exemple, plus du triple du montant en histidine du blé, un composé essentiel pour les nourrissons qui ne peuvent le synthétiser avant l'âge adulte. Il est donc fortement recommandé que les enfants acquièrent cet acide aminé à travers leur alimentation, en particulier pendant les périodes de croissance. Il en est de même pour l'arginine qui est considéré comme presque indispensable dans la petite enfance, l'enfance et l'adolescence (FAO, 2011). Pour toutes ces raisons, des chercheurs tentent actuellement d'incorporer le quinoa dans des aliments destinés aux nourrissons.

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 différentes teneurs en acides aminés répondent également aux exigences recommandées pour les enfants d'âge préscolaire et les enfants scolarisés (FAO/WHO/ONU, 1985).

L'étude de la qualité nutritionnelle des protéines prend également en compte leur digestibilité. En effet, établir le constat que les graines de quinoa présentent une richesse particulière en protéines, et notamment en acides aminés essentiels, est loin de suffire car les valeurs théoriques ne permettent pas d'évaluer la biodisponibilité des différents nutriments.

De plus, l'étude de la digestibilité nécessite de prendre en compte la présence dans les graines de substances dites « antinutritionnelles » qui interfèrent avec l'utilisation biologique des nutriments. Il a été montré, par exemple, que les acides aminés de la farine de quinoa brute (non lavée) n'étaient pas entièrement disponibles, la faute à la présence de saponines qui se concentrent dans l'enveloppe de la graine. L'élimination de ces composés sera donc nécessaire pour augmenter la biodisponibilité mais il faut se méfier des certains procédés

utilisés pour retirer la coque de la graine qui entraînent une perte de la valeur nutritive. La lysine, en particulier, perd totalement son utilité biologique lorsque les graines ont été grillées (FAO, 2011).

Devant la complexité que représente le sujet de la biodisponibilité, de nombreuses études expérimentales ont été menées en nutrition animale et humaine. Toutes s'avèrent rassurantes et ont confirmé la bonne qualité des protéines du quinoa, en montrant notamment que celle-ci était comparable à la qualité protéique de la caséine, protéine de lait souvent citée comme référence. (Mahoney *et al.*, 1975 ; López de Romaña *et al.*, 1981 ; Gross *et al.*, 1989 ; Ranhotra *et al.*, 1993 ; Ruales et Nair, 1994b).

Pour certaines populations du monde, incorporer des protéines de haute qualité dans le régime alimentaire est une préoccupation, en particulier pour les personnes qui mangent rarement de protéines animales, et qui ont besoin d'en trouver dans d'autres aliments comme les céréales, les légumineuses et les autres graines. En effet, même lorsque l'apport énergétique de ces aliments est adéquat, des niveaux insuffisants d'acides aminés essentiels peuvent augmenter la prévalence de la malnutrition. Le quinoa semble pouvoir répondre à ces attentes.

b. 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).

c. 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.

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).

B. Glucides

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

a. 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%).

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%) (Atwell *et al.*, 1983 ; Lorenz, 1990 ; Qian et Kuhn, 1999 ; Praznik *et al.*, 1999 ; Tang *et al.*, 2002 ; 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 (Atwell *et al.*, 1983 ; Lorenz, 1990 ; Qian et Kuhn, 1999 ; 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. Les volumes sont plus faibles, le grain non uniforme avec des parois cellulaires épaisses, la texture dense et compacte. Globalement, la performance de l'amidon du quinoa dans les produits de boulangerie est similaire à celle d'autres amidons non céréaliers (amarante ou pomme de terre) (Lorenz, 1990).

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 font 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).

b. 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.

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.*, 2015b).

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,
- et les fibres insolubles dans l'eau telles que la cellulose ou la lignine.

Les graines de quinoa contiennent entre 10 et 14% de fibres alimentaires totales qui sont particulièrement présentes dans l'embryon. Cette teneur en fibres totales est comparable à celle d'autres céréales, cependant, la composition des fibres du quinoa ressemble d'avantage à celle des fruits, légumes et légumineuses (Alvarez-Jubete *et al.*, 2009 ; Repo-Carrasco-Valencia et Serna, 2011 ; Valcárcel-Yamani et da Silva, 2012 ; Lamothe *et al.*, 2015).

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).

c. 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).

C. 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 (Dini *et al.*, 1992 ; Koziol, 1992 ; Ruales et Nair, 1993a ; Ando *et al.*, 2002 ; Wright *et al.*, 2002 ; Repo-Carrasco *et al.*, 2003 ; Alvarez-Jubete *et al.*, 2010a ; Gallego Villa *et al.*, 2014 ; 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 (Przybyski *et al.*, 1994) (Tableau 6).

Tableau 6: Composition lipidique dans la graine de quinoa (en %)

	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

Il a ainsi été trouvé des quantités élevées de lipides neutres dans la graine entière de quinoa (56%) mais également dans toutes les fractions de graine analysées séparément (40% dans la coque, 76% dans le son et 70% dans la farine). Les triglycérides constituent la principale fraction puisqu'ils représentent plus de 70% des lipides neutres, suivi des diglycérides également présents dans toute la graine et contribuant pour 20% de la fraction lipidique neutre, les monoglycérides et les cires étant minoritaires.

Les lipides polaires majoritaires présents dans la graine de quinoa entière sont : lysophosphatidyl éthanolamine, phosphatidyl éthanolamine, phosphatidyl choline et phosphatidyl inositol ; tandis que dans le son et la farine de quinoa les principaux phospholipides sont la phosphatidyl choline et la lysophosphatidyl éthanolamine.

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.

La composition en acides gras des lipides du quinoa a été caractérisée comme suit (Tableau 7) :

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

Tableau 7: 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 tétracosénoïque	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

⁽²⁾ Alvarez-Jubete *et al.*, 2009

⁽³⁾ Ryan *et al.*, 2007

⁽⁴⁾ Koziol, 1992

⁽⁵⁾ Ruales et Nair, 1993a

La majorité des acides gras sont synthétisés par l'organisme, à l'exception pour l'homme de deux acides gras qualifiés d'essentiels et devant être apportés par un régime alimentaire adéquat. Il s'agit des acides gras polyinsaturés linoléique (oméga-6) et α -linoléique (oméga-3) présents en grande quantité dans l'huile de quinoa puisqu'ils constituent à eux seuls plus de 60% des acides gras retrouvés dans la fraction lipidique, avec une proportion largement supérieure d'acide linoléique. Le rapport oméga-6/oméga-3 est de 6/1, qui est généralement plus favorable que celui des autres huiles végétales (Tang *et al.*, 2015a) et se rapproche du rapport recommandé de 5/1. La consommation de quinoa permettrait ainsi d'améliorer l'équilibre global de la part lipidique dans l'alimentation occidentale à l'heure où le rapport de 20/1 est couramment observé.

Les acides gras de la graine de quinoa forment donc une huile d'une haute qualité nutritive, mais les bienfaits ne s'arrêtent pas là. En effet, les autorités compétentes condamnent les acides gras saturés à cause de leurs nombreux effets délétères et préconisent un apport suffisant en acides gras insaturés (oméga-3 et oméga-6), dont l'effet protecteur sur le système cardio-vasculaire en particulier n'est plus à prouver. Le quinoa répond à ses recommandations avec sa haute teneur en acides gras insaturés qui représentent plus de 85% des acides gras totaux, avec seulement 14% d'acides gras saturés.

D. Minéraux

a. Minéraux simples

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 ; Ruales et Nair, 1993b ; Koziol, 1992).

La comparaison avec des céréales plus communes montre que le quinoa se distingue particulièrement par sa haute teneur en calcium, fer, magnésium et potassium (Tableau 8). Malheureusement, nous verrons que la disponibilité de ces minéraux peut être affectée par certains composés du quinoa, sans compter les différents procédés (mécanique et/ou lavage) utilisés pour éliminer l'enveloppe des graines qui sont susceptibles de réduire la teneur en minéraux. Cette perte peut parfois être considérable comme pour le fer, le manganèse et le potassium (par exemple, 46% du potassium peut être perdu) (Ruales et Nair, 1993a).

Tableau 8: Comparaison de la teneur moyenne en minéraux du quinoa avec d'autres céréales (mg/100g)

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

L'étude de la distribution des minéraux dans les graines de quinoa a révélé que le phosphore, le potassium et le magnésium étaient localisés dans le tissu embryonnaire. Ces derniers se trouvaient être des composants des cristaux globulaires de phytine au sein des corps protéiques. Le phosphore a été suggéré comme étant de l'acide phytique, tandis que le potassium et le magnésium sont conçus pour former des complexes avec l'acide phytique et ainsi donner des phytates. Du calcium et du potassium étaient présents dans le péricarpe où la paroi cellulaire était abondamment développée, ce qui laissait penser que ces minéraux étaient associés à de la pectine (Konishi *et al.*, 2004).

b. Oxalates

L'oxalate est un sel inorganique qui constitue une composante commune des aliments végétaux. Environ 2 à 20% de l'oxalate ingéré est absorbée par le tractus gastro-intestinal et une portion importante de l'oxalate urinaire provient de l'alimentation (Holmes *et al.*, 1995). L'oxalate est d'ailleurs un composant majeur des calculs urinaires qui se forment dans le type le plus commun de la maladie lithiasique. Cette observation a conduit à réévaluer la contribution de l'oxalate alimentaire dans l'excrétion urinaire d'oxalate, ainsi qu'à déterminer les quantités dans les aliments réputés pour renfermer des oxalates.

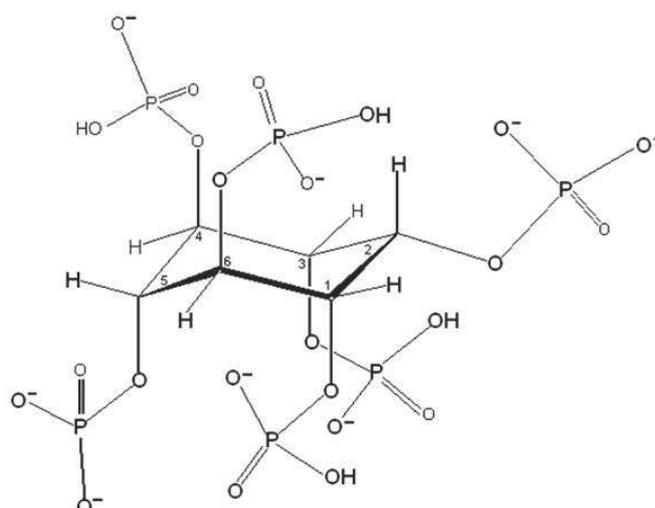
L'oxalate se produit dans les tissus végétaux sous des formes solubles et insolubles. Dans le cas du quinoa, les oxalates semblent s'accumuler uniquement dans les graines, avec un taux d'oxalate soluble de 131 mg/100g et de 184 mg/100g pour l'oxalate total (Siener *et al.*, 2006).

E. Acide phytique

A l'origine, ce sont de petites particules rondes retrouvées dans diverses graines de plantes et de taille similaire à des grains d'amidon de pommes de terre qui ont suscité l'attention dans les années 1850. Dépourvues de protéines, de lipides ou encore d'amidon, ces particules se sont révélées être riches en phosphore, calcium et magnésium. Le nom de « phytine » leur a d'abord été attribué en relation avec leur origine exclusivement végétale (Pfeffer, 1872).

Par la suite, des études ont montré que l'hydrolyse de la phytine par l'acide chlorhydrique libérait de l'acide phosphorique et de l'inositol (Schulze et Winterstein, 1896 ; Winterstein, 1897 ; Posternak, 1903). La structure moléculaire de la phytine a ensuite été sujette à de multiples controverses et c'est en 1914 qu'Anderson a présenté la structure du myo-inositol-1,2,3,4,5,6-hexakis dihydrogène phosphate (IP6), également appelé acide phytique, qui a pu être confirmée par différentes méthodes analytiques modernes (Johnson et Tate, 1969 ; Emsley et Niazi, 1981 ; Barrientos et Murthy, 1996) (Figure 13).

Figure 13: Structure de l'acide phytique



Les phytates, sels de l'acide phytique, sont largement distribués dans le règne végétal et sont particulièrement représentés dans les céréales et les légumineuses, les noix et les graines oléagineuses ; mais aussi à plus faible teneur dans les racines, les tubercules et les légumes (Vats et Barnejee, 2004 ; Schlemmer *et al.*, 2009). Ils constituent la principale forme de stockage d'inositol et de phosphore dans les plantes, et en particulier dans les graines dans lesquelles ils s'accumulent rapidement pendant la période de maturation jusqu'à représenter entre 60 et 90% du phosphore total (Loewus, 2002 ; Gupta *et al.*, 2013). Au cours de la germination des graines, ces phytates sont hydrolysés et le phosphore ainsi que des minéraux tels que le calcium et le magnésium deviennent disponibles pour le développement des plants (Tabekhia et Luh, 1980 ; Beal et Mehta, 1985).

Les graines de quinoa présentent une teneur moyenne en phytates de 2,06 g/100g (Lazarte *et al.*, 2015), une valeur environ deux fois plus élevée que celles rapportées antérieurement : 1,18g/100g (Koziol, 1992) et 1,04g/100g (Ruales et Nair, 1993b) sur une base de grains ni polis, ni lavés. Encore une fois, ces divergences sont liées à l'origine des plants, aux différents cultivars, aux variations de la teneur en minéraux dans le sol, sans oublier l'influence de la méthode de quantification utilisée.

Après polissage et lavage des graines, la concentration en phytates diminue d'environ 30%, ce qui laisse penser que, contrairement au blé et au seigle (Kent, 1984 ; Hallberg *et al.*, 1987), l'acide phytique ne se trouve pas uniquement dans les couches externes des graines mais est également distribué uniformément dans l'endosperme (Ruales et Nair, 1993b).

F. 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 9).

Tableau 9: Comparaison de la teneur en vitamines de la graine de quinoa avec d'autres céréales (µg/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 :					
α-tocophérol	8,78 ⁽³⁾	-	5,9	4,9	5,7
β-tocophérol	0,64 ⁽³⁾	-	-	-	-
γ-tocophérol	38,8 ⁽³⁾	-	-	-	-
δ-tocophérol	1,73 ⁽³⁾	-	-	-	-
Tocotriénols :					
α-tocotriénol	0,51 ⁽³⁾	-	-	-	-
β-tocotriénol	0,82 ⁽³⁾	-	-	-	-

⁽¹⁾ USDA, 2005

⁽²⁾ USDA, 2015

⁽³⁾ Moyenne des valeurs obtenues pour trois géotypes typiques de quinoa (blanc, rouge et noir) (Tang *et al.*, 2015a)

⁽⁴⁾ Moyenne des valeurs obtenues pour 175 géotypes de blé (Lampi *et al.*, 2008)

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 $\mu\text{g/g}$) est similaire à celle de céréales comme le blé (49,4 $\mu\text{g/g}$), cependant la composition en tocophérols est différente. Dans les graines de quinoa, l'isoforme prédominant est le γ -tocophérol pour tous les génotypes étudiés, au lieu de l' α -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).

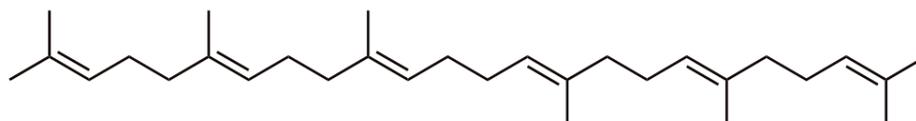
G. Terpènes et stéroïdes

a. 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.

Le squalène, un isoprénoïde de 30C (Figure 14), 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 10).

Figure 14: Structure du squalène



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

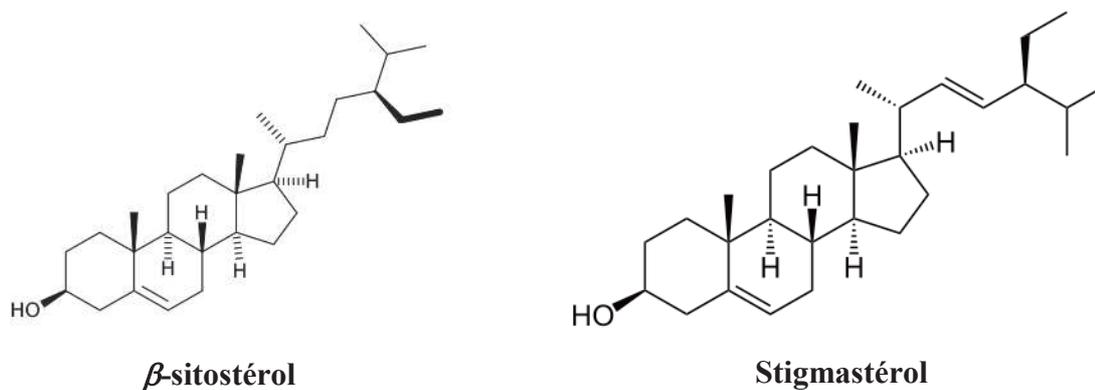
le cas des membranes cellulaires animales. Ils sont particulièrement abondants dans les huiles végétales, les noix, les graines et les céréales (Weihrauch et Gardner, 1978 ; Moreau *et al.*, 2002).

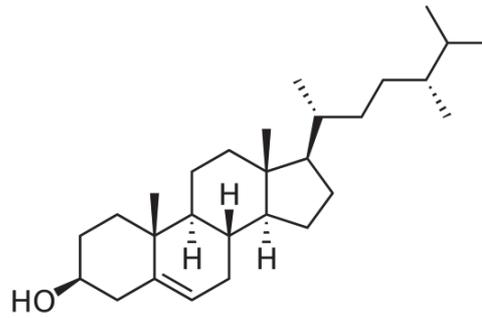
Les phytostérols représentés dans les graines de quinoa sont le β -sitostérol, largement majoritaire, le campestérol et le stigmastérol (Figure 15), qui sont les stérols végétaux les plus abondants (Tableau 10). Les niveaux retrouvés dans le quinoa sont plus élevés que dans l'orge et le maïs, comparables à ceux déterminés dans le seigle. A l'inverse, les valeurs sont nettement inférieures à celles des légumineuses, en particulier concernant le β -sitostérol et le stigmastérol (Ryan *et al.*, 2007).

Tableau 10: Teneur en squalène et phytostérols dans les graines de quinoa et comparaison avec d'autres céréales et légumineuses (mg/100g)

	Squalène	Phytostérols			
		β -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

Figure 15: Structure des principaux phytostérols





Campesterol

b. 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).

Les saponines sont tout d'abord des métabolites secondaires dont la fonction première est de protéger la plante des agressions naturelles en s'accumulant dans les régions les plus exposées à l'attaque des champignons, des insectes ou des oiseaux. Elles ont ainsi été détectées dans toutes les parties de la plante de quinoa, les feuilles, les fleurs, les fruits, et l'enveloppe des graines (Mizui *et al.*, 1988, 1990 ; Cuadrado *et al.*, 1995 ; Mastebroek *et al.*, 2000 ; Kuljanabhagavad *et al.*, 2008).

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 sapogénines 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).

En outre, la proportion en saponines varie également en fonction des conditions environnementales. Par exemple, il a été rapporté que les plants de quinoa cultivés à une altitude plus basse et donc soumis à un climat plus chaud contiennent plus de saponines que les mêmes variétés cultivés à une altitude supérieure (Koziol, 1992). Ceci explique les divergences importantes retrouvées dans la littérature concernant leur concentration, sans compter le manque de spécificité des méthodes analytiques employées à cette époque qui ne permettaient qu'une interprétation semi-quantitative des données obtenues.

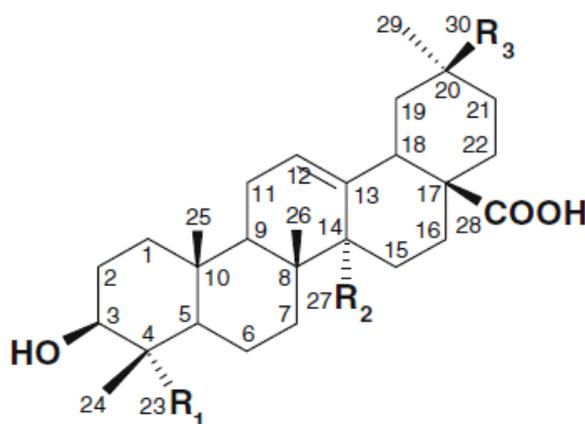
Les saponines du quinoa sont exclusivement triterpéniques et sont donc constituées d'un aglycone triterpénoïde composé d'un squelette en C30 pentacyclique. Ce sont des composés très polaires avec des poids moléculaires relativement grands et qui se produisent sous la forme de mélanges complexes. Bien que la présence de saponines dans les graines de quinoa soit connue depuis longtemps, peu d'études ont été menées pour déterminer leur structure chimique et les progrès réalisés dans ce domaine sont relativement récents.

Quatre aglycones différents ont d'abord été mis en évidence :

- L'acide oléanique, majoritaire dans les graines ;
- L'acide phytolaccagénique ;
- L'hédéragénine ;
- Et l'acide serjanique.

Ces sapogénines sont résumées dans le Tableau 11, chacune d'elles étant dérivée d'un squelette β -amyrine (Kuljanabhadgavad et Wink, 2009).

Tableau 11: Structure chimique des principaux aglycones des saponines du quinoa



Aglycone	R ₁	R ₂	R ₃	Formule	PM
Acide oléanique	CH ₃	CH ₃	CH ₃	C ₃₀ H ₄₈ O ₃	456
Hédéragénine	CH ₂ OH	CH ₃	CH ₃	C ₃₀ H ₄₈ O ₄	472
Acide phytolaccagénique	CH ₂ OH	CH ₃	COOCH ₃	C ₃₁ H ₄₈ O ₆	516
Acide serjanique	CH ₃	CH ₃	COOCH ₃	C ₃₁ H ₄₈ O ₅	500

Ces saponines sont ensuite classées en trois groupes principaux en fonction du nombre de chaînes de sucre :

- Les saponines monodesmosidiques ont une chaîne de sucre simple, le plus souvent attachée en C3 ;
- les saponines bidesmosidiques ont une chaîne de sucre fixée normalement par une liaison éther en C3, et une autre attachée par liaison ester en C28 ;
- les saponines tridesmosidiques comportent trois chaînes glucidiques et sont plutôt rarement trouvés.

Les premières études ont déterminé l'existence de 4 saponines triterpéniques monodesmosidiques et 22 de type bidesmosidique basées sur ces quatre aglycones (Cuadrado *et al.*, 1995 ; Dini *et al.*, 2001a, b ; Woldemichael et Wink, 2001 ; Zhu *et al.*, 2002).

Plus récemment, une nouvelle méthode d'analyse a permis d'approfondir nos connaissances sur la structure chimique des saponines, des aglycones et des séquences saccharidiques (composition et ramification) (Madl *et al.*, 2006). Les graines de quinoa révèlent alors plus de 80 saponines triterpéniques, comprenant 19 des saponines précédemment signalées et 68 nouveaux composants. L'existence de 5 nouveaux aglycones triterpéniques a également été découverte. Cette approche, couplant la spectrométrie de masse à ionisation électrospray avec la nano-HPLC, s'avère rapide et complète. Elle pourrait être particulièrement adaptée pour le contrôle qualité et le criblage des extraits de *Chenopodium quinoa* destinés à une utilisation dans l'industrie pharmaceutique, agricole ou pour des applications industrielles.

Si la plupart des saponines triterpéniques signalées dans le quinoa sont de type mono- et bidesmosidique pour tous les aglycones répertoriés, une saponine de type tridesmosidique de l'hédéragénine a tout de même été rapportée. Les chaînes glucidiques se composent essentiellement de glucose, de galactose, d'arabinose, d'acide glucuronique et de xylose (Kuljanabhagavad et Wink, 2009).

La présence de saponines triterpéniques a été rapportée dans une grande variété de plantes médicinales, en particulier de l'Orient. De plus, les saponines isolées de plantes présentent diverses activités biologiques, par exemple, hémolytique, anti-inflammatoire, immunomodulatrice, cytotoxique, anti-tumorale, antimutagène, antidiabétique, antivirale, antibactérienne et molluscicide (Sparg *et al.*, 2004). Toutes ces propriétés observées, ajoutées à la diversité chimique large des saponines triterpéniques du quinoa, ont entraîné un regain d'intérêt pour la caractérisation de ces composés et l'étude de leurs propriétés, dans le but surtout d'étudier leur potentiel en tant qu'agent phytothérapeutique et chimiothérapeutique.

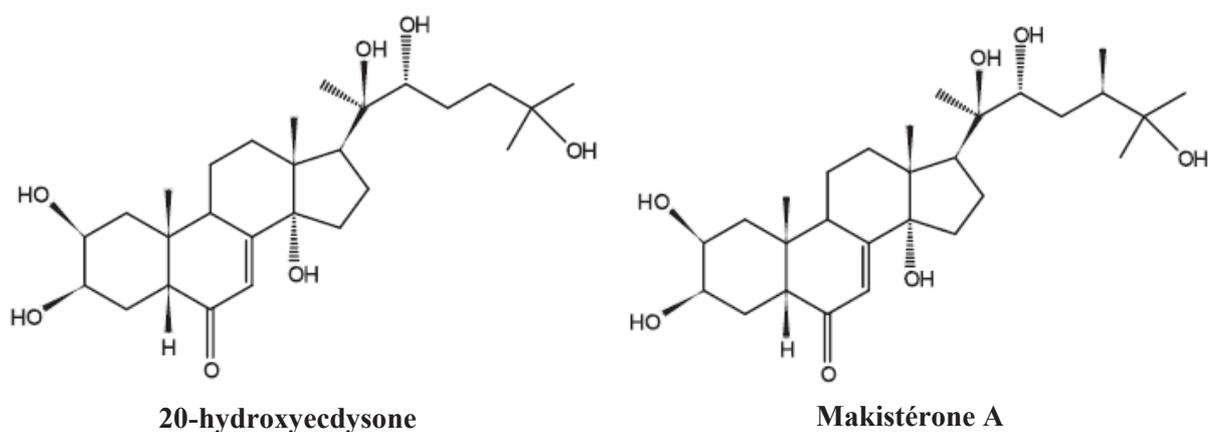
c. Phytoecdystéroïdes

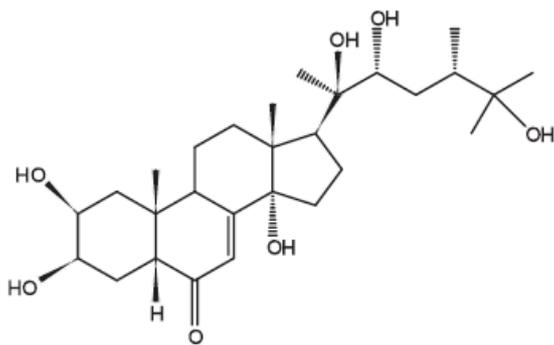
Les ecdystéroïdes sont d'abord des hormones contrôlant la mue et la reproduction des arthropodes (zoo-ecdystéroïdes). La présence d'analogues de ces molécules a été identifiée en tant que métabolites secondaires chez les végétaux en 1966, ceux-ci utilisant les phytoecdystéroïdes pour se protéger des insectes et des nématodes (Dinan et Lafont, 2006). Récemment, ces molécules ont évoqué divers effets pharmacologiques sur les mammifères dont la plupart seraient plutôt bénéfiques pour la santé humaine.

Seulement 5 à 6% des espèces de plantes contiennent ces composés et leur présence dans l'alimentation humaine est très limitée. En effet, la plupart des espèces cultivées n'en contiennent pas, avec quelques exceptions comme les épinards (40 à 200 $\mu\text{g/g}$ dans les jeunes feuilles) (Grebenok et Adler, 1993) et, dans une moindre mesure, les champignons de Paris (2 à 8 $\mu\text{g/g}$) (Findeisen, 2004).

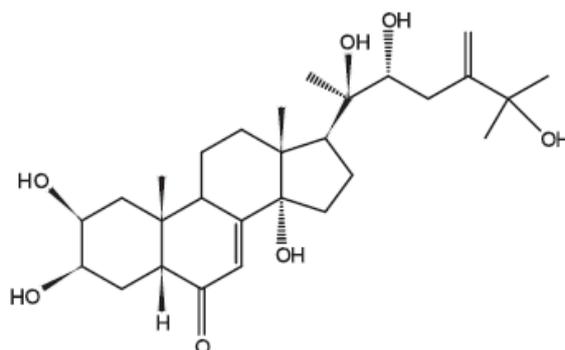
Parmi les cultures comestibles, les graines de quinoa contiennent les plus hauts niveaux de phytoecdystéroïdes avec une gamme allant de 138 à 570 $\mu\text{g/g}$ au total. Malgré un cocktail complexe d'ecdystéroïdes, des composés principaux ont pu être identifiés, à savoir le 20-hydroxyecdysone (20-HE) qui est largement majoritaire (entre 60 et 85% du total des phytoecdystéroïdes isolés), et plusieurs mineurs dont le makistéron A, le 24-épi-makistéron A et le 24(28)-dehydromakistéron A (Zhu *et al.*, 2001 ; Kumpun *et al.*, 2011 ; Graf *et al.*, 2014, 2015a) (Figure 16).

Figure 16: 20-hydroxyecdysone et quelques phytoecdystéroïdes (Kumpun *et al.*, 2011)





24-épi-makistéron A



24(28)-dehydromakistéron A

Ces substances sont concentrées dans l'embryon riche en huile des graines, qui représente 30% du poids total de la graine et contient à lui seul 50 à 60% du 20-HE total. On pourrait espérer accroître la teneur en phytoecdystéroïdes en utilisant des procédés visant à améliorer la teneur en huile. Outre de grandes quantités de 20-HE, les graines contiennent un large éventail d'autres ecdystéroïdes en plus faibles quantités, dont certains restent encore à découvrir.

Les niveaux en 20-HE dans les graines de quinoa ont montré des variations importantes en fonction de leur origine, avec des valeurs allant de 184 et 484 $\mu\text{g/g}$ selon la source. Cependant, les facteurs génétiques et environnementaux qui affectent le contenu en phytoecdystéroïdes dans les graines de quinoa sont actuellement inconnus. De plus, compte tenu du fait que les graines contiennent aussi des quantités variables de saponines, il serait intéressant de déterminer si une relation (positive ou négative) existe entre la teneur en ecdystéroïdes et en saponines. (Kumpun *et al.*, 2011).

H. 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.

a. 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.

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 et l'acide férulique (Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2010) (Figure 17) (Tableau 12).

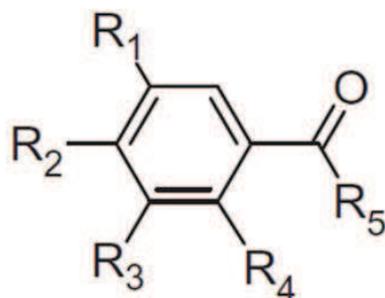
Tableau 12: Teneur moyenne en acides phénoliques dans les graines de quinoa (mg/100g)

Acides phénoliques	
Acide caféique	0,7
Acide férulique	15
Acide p-coumarique	8
Acide p-hydroxybenzoïque	2,9
Acide vanillique	11
Total	37

En raison de l'absence de normes de référence pour les acides phénoliques solubles liés, les résultats doivent être considérés comme provisoires et sont donnés seulement comme part de pourcentage d'acides phénoliques totaux. 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

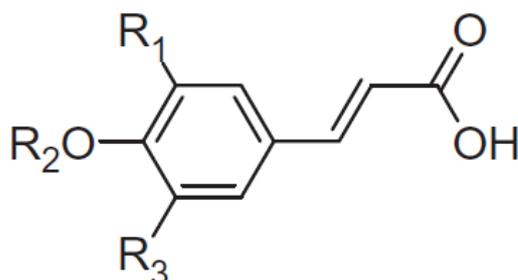
rapport aux céréales courantes comme le son de blé (453 mg/100g) ou de seigle (419 mg/100g) mais est similaire aux niveaux trouvés dans l'avoine, l'orge, le maïs et le riz (entre 25 et 60 mg/100g) (Mattila *et al.*, 2005).

Figure 17: Structure des principaux acides phénoliques (Tang *et al.*, 2015b)



Acide vanillique, $R_1 = R_4 = H$, $R_2 = R_5 = OH$, $R_3 = OCH_3$

Acide p-hydroxybenzoïque, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = H$, $R_5 = OH$



Acide férulique, $R_1 = R_2 = H$, $R_3 = OCH_3$

Acide p-coumarique, $R_1 = R_2 = R_3 = H$

Acide caféique, $R_1 = R_2 = H$, $R_3 = OH$

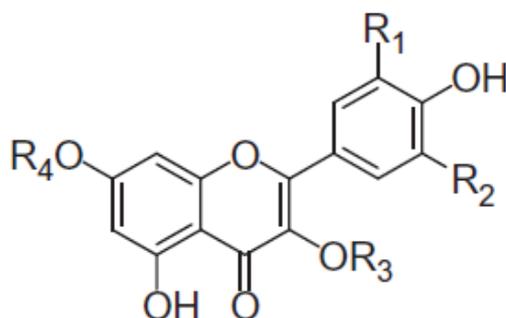
b. Flavonoïdes

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 (Figure 18) ; alors que la myricétine et l'isorhamnétine n'ont pas été retrouvés dans toutes les variétés (Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2010) (Tableau 13).

Tableau 13: Teneur moyenne en flavonoïdes dans les graines de quinoa (mg/100g)

Flavonoïdes	
Quercétine	36
Kaempférol	20
Myricétine	0,5
Isorhamnétine	0,4
Total	58

Figure 18: Structure des principaux flavonoïdes (Tang *et al.*, 2015b)



Quercétine, $R_1 = R_3 = R_4 = H$, $R_2 = OH$

Kaempférol, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = H$

Les graines de quinoa sont aujourd'hui considérées comme une très bonne source de flavonoïdes. En effet, les niveaux de flavonoïdes dans les graines de quinoa dépassent ceux retrouvés dans des baies réputées très riches en ces composés, telles que les airelles et les canneberges qui ne contiennent que 10 mg/100g de quercétine environ (Mattila *et al.*, 2000). Cependant, d'autres études sont nécessaires afin d'identifier les variétés de quinoa les plus prometteuses à cet égard.

c. 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).

Une autre étude n'a pu mettre en évidence la présence de tanins, ni dans le quinoa entier brut, ni dans le quinoa poli et lavé. Cette divergence des résultats peut s'expliquer en partie par le fait que la teneur des différents composés présents dans les végétaux alimentaires peut varier en fonction de la variété et des conditions de croissance (Ruales et Nair, 1993b).

I. Pigments

a. 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 β -carotène, l' α -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 (Figure 19), dans leurs formes *trans*, avec des teneurs moyennes de 9,45 µg/g et 0,47 µg/g, respectivement (Tableau 14).

Figure 19: Lutéine et zéaxanthine

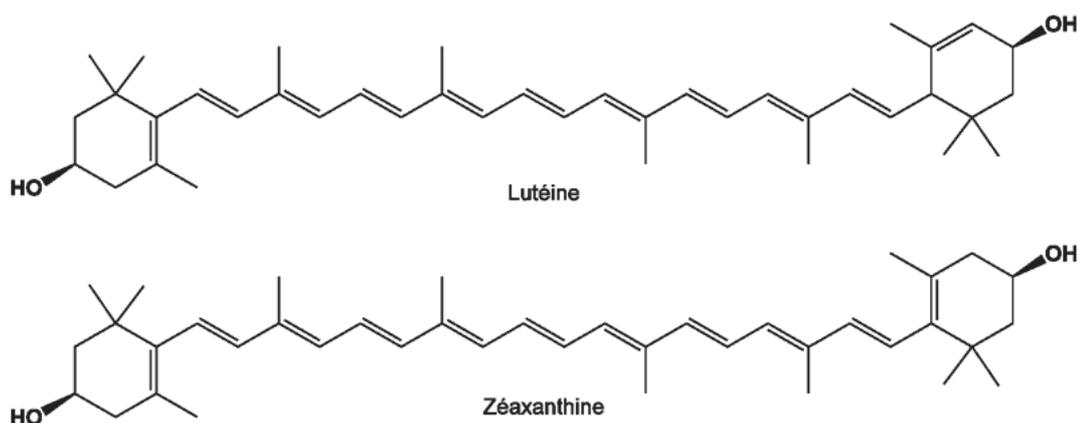


Tableau 14: Comparaison des teneurs totales en caroténoïdes et en caroténoïdes prédominants dans les graines de quinoa et dans une sélection de céréales (µg/g)

	Quinoa ⁽¹⁾	Blé ⁽²⁾	Orge ⁽²⁾	Maïs ⁽²⁾
Teneur totale en caroténoïdes	14,8	2,57	3,4	18,19
Total lutéine	10,4	0,819	0,497	3,689
All- <i>trans</i> -lutéine	9,45	-	-	-
Total zéaxanthine	0,74	0,438	0,637	9,879
All- <i>trans</i> -zéaxanthine	0,47	-	-	-

⁽¹⁾ Moyenne des valeurs obtenues pour trois génotypes typiques de quinoa (blanc, rouge et noir) (Tang *et al.*, 2015a)

⁽²⁾ Ndolo et Beta, 2013

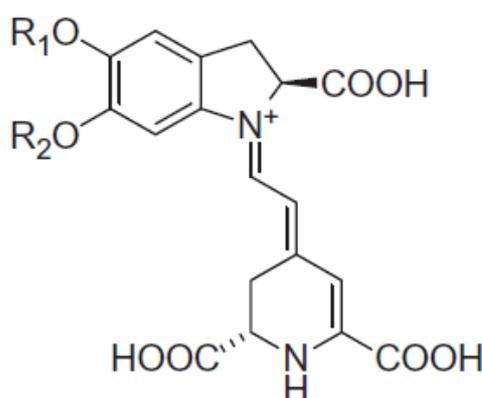
Outre les isomères all-*trans*, environ 10% des caroténoïdes totaux sont des isomères *cis*, certainement formés au cours de la récolte, du stockage ou de l'extraction en laboratoire. Les caroténoïdes étant à l'origine de la coloration des graines, c'est tout logiquement que les graines les plus colorées (ou sombres) présentent les niveaux les plus élevés en caroténoïdes (Tang *et al.*, 2015a).

Les teneurs en caroténoïdes totaux et en lutéine dans le quinoa sont nettement plus élevées que dans la plupart des céréales communes (Ndolo et Beta, 2013). Une autre caractéristique favorable qui augmente les avantages potentiels du quinoa pour la santé.

b. Bétacyanines

Les bétacyanines sont des pigments de la famille des bétalaïnes 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 (Figure 20) (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).

Figure 20: Structure des principales bétacyanines



Bétanine, $R_1 = \text{glucose}$, S , $R_2 = \text{H}$

Isobétanine, $R_1 = \text{glucose}$, R , $R_2 = \text{H}$

En effet, bétalaïnes et anthocyanines peuvent avoir des propriétés physico-chimiques similaires, par exemple la solubilité dans l'eau, la couleur pourpre (absorbance à 520 nm) ou une distribution similaire dans les tissus végétaux. Cependant, ils sont structurellement et biosynthétiquement distincts. Les bétalaïnes contiennent de l'azote et sont synthétisés à partir de la tyrosine, tandis que les anthocyanes n'ont pas d'azote et sont synthétisés à partir de la condensation d'un « triacétate » et d'un acide cinnamique. Plus important encore, il est bien établi que les bétalaïnes et les anthocyanes sont des pigments mutuellement exclusifs, c'est à dire que les plantes produisant des anthocyanes ne peuvent pas synthétiser de bétalaïnes et vice versa (Stafford, 1994).

De plus, le quinoa a longtemps appartenu à la famille des Chenopodiaceae, tout comme la betterave qu'on sait renfermer des bétacyanines. Depuis peu, le quinoa est classé dans la famille des Amaranthaceae dont fait partie l'amarante, également connue pour contenir des bétalaïnes dans les feuilles et les graines (Repo-Carrasco-Valencia *et al.*, 2010). Pour toutes ces raisons, il devenait nécessaire de confirmer l'identité des pigments dans les graines de quinoa colorées.

V. PROPRIETES PHARMACOLOGIQUES ET NUTRITION

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 ».

Les précurseurs de ce concept apparus 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'empiète 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).

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.

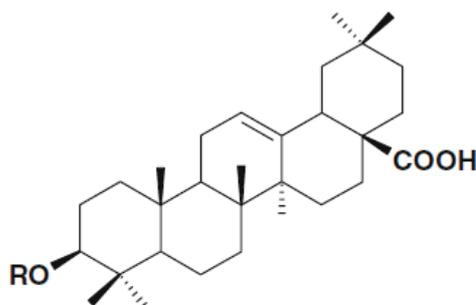
Précisons que dans certains cas, et en particulier concernant les saponines, les activités rapportées n'ont pas systématiquement été étudiées avec le quinoa, toutefois il existe suffisamment de preuves de leurs effets dans d'autres végétaux.

A. Propriétés pharmacologiques

a. Activité anti-inflammatoire

L'acide 3-O-β-D-glucopyranosyl oléanolique (Figure 21), 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).

Figure 21: Structure de l'acide 3-O-β-D-glucopyranosyl oléanolique (C₃₆H₅₈O₈)



R = 1 unité de glucose

Plus récemment, des fractions de saponines obtenues à partir de graines de quinoa d'origine chinoise ont montré une activité anti-inflammatoire sur des cellules macrophages de rongeurs stimulées par une toxine LPS (lipopolysaccharide) promouvant la libération de cytokines pro-inflammatoires (Yao *et al.*, 2014). Les macrophages jouent un rôle critique dans l'inflammation. Après stimulation, ces cellules produisent un certain nombre de médiateurs inflammatoires tels que le NO (oxyde nitrique), le TNF-α et l'interleukine-6. Les fractions de saponines n'ont pas seulement diminué la production de NO, mais ont également inhibé la libération de cytokines inflammatoires. L'effet a été observé à partir d'une concentration de 100 µg/mL, puis a augmenté de façon dose-dépendante.

La principale contrainte des médicaments anti-inflammatoires actuellement commercialisés consiste en leurs effets secondaires indésirables, en particulier l'ulcération qui est un problème commun mais grave. Dans ce contexte, les recherches pour de nouveaux composés anti-inflammatoires portent un intérêt particulier aux produits d'origine végétale.

Plusieurs rapports montrent que la plupart des plantes ayant des saponines possèdent une activité anti-inflammatoire (Suh *et al.*, 1998 ; 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.

b. Activité anti-oxydante

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, bêtaïnes), ainsi que des saponines.

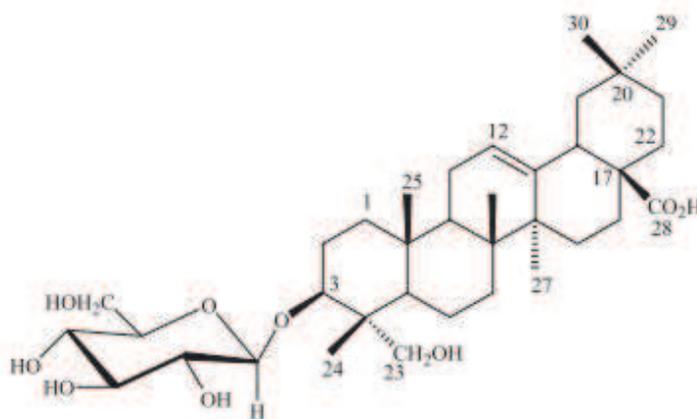
Les lipides du quinoa sont signalés comme généralement stables contre l'oxydation, en dépit de leur haute teneur en acides gras insaturés (> 85%). En fait, ces lipides comptent la présence de quantités abondantes de composés antioxydants, à savoir des tocophérols et des caroténoïdes.

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 (γ -tocophérol). Concernant les acides gras, seuls les acides gras polyinsaturés ont montré une corrélation positive avec l'activité anti-oxydante. 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.

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

La 3-O-(β -D-glucopyranosyl) hédéragénine, une saponine monodesmosidique du quinoa et récemment isolée à partir des fruits de *Hedera colchica*, a fait l'objet d'études approfondies. Au cours de ces investigations, cette saponine a montré une activité antioxydante (Gülçin *et al.*, 2006) (Figure 22).

Figure 22: Structure du 3-O-(β -D-glucopyranosyl)-hédéragénine



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 chimioprévention 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.

c. Activité anti-ulcéreuse

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 anti-ulcéreuse. La gastroprotection 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.

L'administration par voie orale d'une fraction préparée de polysaccharides de 30 et 100 mg/kg, 1 h avant l'induction des lésions avec de l'éthanol absolu, aboutit à une réduction significative de la zone de lésion de 45 et 72%, respectivement, par rapport au groupe témoin placebo. La dose calculée de cette fraction nécessaire pour inhiber 50% des lésions gastriques induites (ID₅₀) est de 38,59 mg/kg. Le témoin positif, l'oméprazole (40 mg/kg par voie orale), un inhibiteur puissant de la sécrétion acide de l'estomac, inhibe les lésions gastriques de 84%.

Dans ce cas précis d'ulcères gastriques induits par de l'éthanol, les polysaccharides interfèrent probablement avec le mécanisme ulcérogène en exerçant une activité cytoprotectrice. La barrière de mucus est un facteur protecteur important pour la muqueuse gastrique contre une attaque aiguë puisqu'elle empêche la pénétration de l'agent nécrosant (Da Silva et Parente, 2010). L'effet protecteur des polysaccharides pour être due à leur capacité à augmenter la synthèse du mucus et/ou à leur aptitude à se lier à la muqueuse de la surface pour exercer le rôle de revêtement protecteur.

Cette constatation laisse présager une utilisation possible de ces polysaccharides issus du quinoa dans la formulation de thérapeutiques antiulcéreuses préventives.

d. Effet sur l'absorption des médicaments

Les saponines du quinoa ont un potentiel pour agir comme adjuvants pour les vaccins administrés par voie muqueuse. Les saponines extraites de la graine de quinoa ont été étudiées pour leur capacité à agir comme adjuvants muqueux lors de leur administration par voie intragastrique ou intranasale avec des antigènes modèles chez la souris. L'administration simultanée d'un mélange de ces saponines avec la toxine cholérique ou de l'ovalbumine a intensifié les réponses d'anticorps spécifiques IgG et IgA contre les antigènes dans le sérum, les sécrétions intestinales et pulmonaires. L'effet de potentialisation par les saponines semble médié, dans une certaine mesure, par une perméabilité accrue des muqueuses, ce qui permet une absorption accrue des antigènes (Estrada *et al.*, 1998).

Tout a commencé avec le constat que certaines saponines d'origine naturelle entraînaient une augmentation de l'absorption intestinale de médicaments lorsqu'ils étaient administrés simultanément (Basu et Rastogi, 1967). Des études plus tardives ont émis l'hypothèse que les saponines induisaient des changements dans la perméabilité intestinale (Johnson *et al.*, 1986 ; Gee *et al.*, 1989). Les saponines du quinoa ont montré l'existence d'une telle activité, avec un mode d'action bien spécifique. En fait, ce sont surtout les saponines monodesmosidiques qui, grâce à leur chaîne latérale lipophile, peuvent plonger dans les membranes biologiques, tandis que la chaîne glucidique hydrophile se lie à des glycoprotéines et des glycolipides extracellulaires. Cette interaction perturbe la fluidité et la perméabilité des biomembranes, facilitant ainsi l'absorption de certaines molécules (Kuljanabhagavad et Wink, 2009).

Ce mécanisme d'action est directement responsable de la toxicité des saponines, mais il laisse également entrevoir une possible utilisation des saponines du quinoa dans le domaine pharmaceutique. En effet, des adjuvants sont couramment utilisés dans la formulation de médicaments afin d'en favoriser ou d'en renforcer l'action. Malgré les résultats encourageants concernant le potentiel des saponines de quinoa à être utilisées comme adjuvants pour des vaccins administrés par voie muqueuse, des études sont encore nécessaires afin d'identifier la(ou les) saponine(s) responsable(s) puisqu'une telle activité a été observée avec des mélanges non purifiés de saponines (Estrada *et al.*, 1998). C'est pourquoi de tels vaccins n'ont pas encore vu le jour, pourtant cet usage serait particulièrement souhaitable pour l'environnement puisqu'il prévoit d'utiliser les sous-produits du quinoa habituellement jetés, tels que les coques.

e. **Activité molluscicide**

Les saponines monodesmosidiques du quinoa ont montré qu'elles étaient à l'origine d'une action molluscicide. Un produit élaboré à partir des coques des graines de quinoa a été développé et testé sur *Pomacea canaliculata*, un escargot d'eau douce ravageur et affectant gravement les cultures de riz dans de nombreux pays asiatiques (San Martín *et al.*, 2008).

Les enveloppes des graines de quinoa présentaient à l'origine une forte teneur de saponines de type bidesmosidique qui ne montraient qu'une activité molluscicide minime. Une activité significative n'a pu être observée que lorsque les enveloppes avaient préalablement subi un traitement alcalin qui a pour effet de convertir les saponines de type bidesmosidique en monodesmosides plus actifs. Le produit obtenu a alors tué 100% des escargots dans les conditions de laboratoire, avec des résultats similaires sur le terrain (Nord de l'Argentine).

Toutefois, il subsiste un doute quant à l'action de ces saponines monodesmosidiques. En effet, l'analyse postérieure des enveloppes traitées n'a pas révélée la présence de saponines monodesmosidiques comme prévu, mais de dérivés de saponines hydrophobes plus actifs, probablement formés entre les saponines et d'autres composés présents dans les coques des graines. En raison de la nature complexe de ces composés, aucun lien direct n'a pu être établi entre l'efficacité du produit et une plus forte teneur en saponines monodesmosidiques. Il a été suggéré que les propriétés molluscicides des saponines étaient liées à la formation de ces composés hydrophobes qui interagissent avec le cholestérol présent dans les membranes des branchies des escargots, provoquant une augmentation de la perméabilité et donc une perte importante d'électrolytes physiologiques (Hostettmann et Marston, 2005).

Aucun produit molluscicide à base de saponines de quinoa n'est encore commercialisé, d'autres études sont nécessaires afin de mieux comprendre le mécanisme qui a conduit à une augmentation de l'activité après le traitement alcalin des coques. Un des avantages du produit développé est son absence de toxicité pour les poissons à la concentration maximale testée. De plus, il pourrait constituer une alternative commerciale respectueuse de l'environnement comparé au niclosamide qui, malgré une grande efficacité contre les escargots, a un effet néfaste sur les plants de riz (Joshi *et al.*, 2008).

f. 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).

L'activité antifongique des saponines s'est montrée généralement inférieure à celle des aglycones seuls. Celle-ci serait donc fortement influencée par le groupe fonctionnel des squelettes aglycones. La présence d'une chaîne glucidique en C3 s'est révélé particulièrement critique pour les propriétés antifongiques des saponines, mais aussi pour la perméabilisation des membranes (Stuardo et San Martín, 2008) ; l'élimination de ces résidus se traduisant souvent par une perte d'activité biologique. De plus, l'activité antifongique s'est avérée plus prononcée pour les saponines monodesmosidiques que pour celles portant plus d'une chaîne glucidique (Woldemichael et Wink, 2001).

B. Nutrition

a. 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.

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.

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 aujourd'hui 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.

De plus en plus courante dans le monde entier (prévalence moyenne estimée à 1% de la population générale) car sûrement plus connue par les médecins et donc d'avantage diagnostiquée, la maladie cœliaque impose des changements alimentaires considérables pouvant avoir un impact significatif sur la vie quotidienne. En effet, la plupart des aliments de base dans le monde, comme le pain ou les pâtes, contiennent du gluten et doivent être évités ;

sans oublier les nombreux plats préparés et même certains médicaments auxquels sont rajoutés des protéines ou de l'amidon de blé contenant du gluten (Catassi et Fasano, 2008).

Malheureusement, des inquiétudes ont été soulevées sur le long terme quant au choix et à la qualité des aliments sans gluten car les résultats d'un certain nombre d'études indiquent un apport déséquilibré en glucides, protéines et matières grasses, ainsi qu'un apport limité en certains nutriments essentiels chez les sujets cœliaques comparés à des témoins (Mariani *et al.*, 1998 ; Bardella *et al.*, 2000 ; Hallert *et al.*, 2002 ; Thompson *et al.*, 2005). En effet, les aliments sans gluten à base de céréales sont souvent fabriqués avec de la farine ou de l'amidon raffiné et ne sont généralement pas fortifiés ou enrichis ; avec pour conséquences des niveaux en vitamines, fer et fibres plus faibles que leurs homologues contenant du gluten (Thompson, 1999).

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 de 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.

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).

b. 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.

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).

Mais alors que la plupart des études cliniques ont impliqué des doses relativement élevées de phytostérols (2 à 7 g/jour) dans des aliments enrichis ; des recherches plus récentes (Ostlund *et al.*, 2002 ; Andersson *et al.*, 2004) ont suggéré que des niveaux beaucoup plus faibles de phytostérols, tels que ceux qui se trouvent naturellement dans les aliments d'origine végétale, peuvent être efficaces pour réduire l'absorption du cholestérol. De telles allégations nécessitent plus d'études, néanmoins le quinoa a montré qu'il était une source intéressante de phytostérols puisqu'il en contient davantage que les céréales (Ryan *et al.*, 2007). On peut donc supposer que sa consommation plus régulière pourrait contribuer à abaisser le taux de cholestérol et ainsi prémunir de nombreuses maladies.

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).

c. 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 dégradé 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.

L'alimentation occidentale, traditionnellement pauvre en phytoecdystéroïdes (Findeisen, 2004) peut donc s'enrichir en ces molécules en consommant d'avantage 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).

Le diabète est un trouble métabolique qui a atteint des proportions épidémiques dans le monde entier et exige de nouvelles stratégies d'intervention efficaces pour le contrôle glycémique. Des procédures de concentration des phytoecdystéroïdes à partir de sources comestibles peuvent faciliter le développement de thérapeutiques rentables à intégrer dans le régime alimentaire. Plusieurs études ont élaboré des extraits enrichis en 20-HE à partir de graines de quinoa (Foucault *et al.*, 2011 ; Graf *et al.*, 2014), avec pour enjeu d'obtenir le meilleur rendement et de limiter l'utilisation de solvants toxiques.

D'autres composants présents dans l'extrait concentré de graines de quinoa peuvent potentialiser l'activité du 20-HE, telles que les flavonoïdes (quercétine et glycosides de kaempférol) qui sont largement rapportés dans la littérature pour avoir des propriétés antidiabétiques et anti-obésité (Da-Silva *et al.*, 2007 ; Jeong *et al.*, 2012). De plus, l'huile de quinoa est en grande partie composée d'acides gras insaturés oméga-3 et oméga-6 qui améliorent la sensibilité à l'insuline (Vega-Galvez *et al.*, 2010) et induisent une plus faible incidence du diabète de type 2 à la condition d'un apport alimentaire suffisant (Hu *et al.*, 1999).

Finalement, nous avons vu que les graines de quinoa ont un faible indice glycémique (Oshodi *et al.*, 1999), un élément clé dans la prévention et le traitement du diabète. Cet indice reflète la rapidité avec laquelle les glucides (ou sucres) d'un aliment sont digérés, convertis et retrouvés sous forme de glucose dans le sang. Le faible indice du quinoa signifie donc que sa consommation n'entraîne pas de pics de glycémie trop élevés, ce qui en fait un aliment intéressant dans le régime alimentaire des diabétiques de type 2.

d. 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.

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).

C. Anti-nutrition

a. 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 anti-nutriments ou facteurs antinutritionnels (Akande, 2010). Ces facteurs interfèrent avec l'utilisation des nutriments alimentaires de différentes façons, comme par exemple la réduction de la digestibilité des protéines, la liaison à divers nutriments ou en endommageant la paroi de l'intestin et réduisant ainsi l'efficacité digestive (Doublecz, 2011).

Il existe une large distribution de ces constituants biologiquement actifs à travers le règne végétal, en particulier dans les plantes utilisées comme aliments pour animaux ou dans la nutrition humaine. Ces composés sont naturellement présents dans les plantes mais peuvent

également être dus à une contamination d'origine fongique ou liée au sol, à d'autres facteurs environnementaux, ou auront pu être acquis auprès d'engrais et de pesticides (Igile, 1996).

Leurs effets sur l'organisme dépendent du type de produit et de la concentration à laquelle ils sont présents dans le produit alimentaire. De plus, il a été observé que la concentration de ces anti-nutriments dans les plantes sources de protéines variait selon les espèces, les cultivars et les méthodes de traitement post-récolte (Akande, 2010). Il est important de souligner que le rôle principal des facteurs antinutritionnels au sein d'une plante, présents autant dans les feuilles que dans les graines, est de la protéger contre les agressions extérieures telles que les moisissures, les bactéries et les oiseaux (Doublecz, 2011).

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.

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 appropriés (Kersten *et al.*, 1991 ; Sugano *et al.*, 1993).

b. Effet néfaste sur la croissance

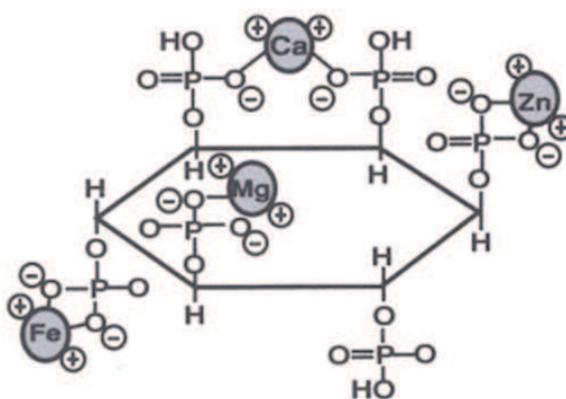
Les saponines sont le principal facteur antinutritionnel des graines de quinoa. Des études chez le rat ont montré que les animaux nourris avec du quinoa amer non lavé développaient une aversion alimentaire importante et une réduction de l'efficacité de la conversion alimentaire (indice mesurant l'efficacité 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).

c. Effet négatif sur la digestion et l'utilisation des minéraux

L'acide phytique interfère de façon importante avec l'absorption des minéraux, un phénomène qui s'explique par sa structure même. Dans des conditions physiologiques, l'acide phytique est fortement chargé négativement et montre un grand potentiel pour complexer des cations multivalents de charge positive, en particulier le fer, le zinc, le magnésium et le calcium (Barrientos et Murthy, 1996 ; Cosgrove, 1980 ; Wise, 1995 ; Maenz *et al.*, 1999) (Figure 23).

Ces complexes, solubles dans les conditions acides de l'estomac, précipitent à pH neutre dans l'intestin, entraînant une mauvaise absorption des minéraux et oligo-éléments avec le risque de conduire à un état de carence (Schlemmer *et al.*, 2009). Or, nous avons vu que le quinoa contient de nombreux minéraux essentiels et une consommation excessive en phytates est susceptible de rendre la teneur en minéraux d'une alimentation insuffisante, en particulier chez les enfants. Ces composés constituent alors un obstacle dans les recherches visant à utiliser le quinoa en tant que source fondamentale de nutriments dans les aliments infantiles (Ruales et Nair, 1993b).

Figure 23: Illustration de la complexation des cations polyvalents par l'acide phytique (Leeson et Summers, 2009)



Les valeurs de l'acide phytique dans le quinoa (1 à 2%) se situent dans les mêmes gammes de concentration retrouvées dans les céréales et les légumineuses, soit entre 1 et 3%. Les taux les plus importants ont été répertoriés dans certaines graines oléagineuses comme le sésame mais ce sont les noix qui présentent les valeurs les plus élevées, avec jusqu'à plus de 9% d'acide phytique dans les amandes (Schlemmer *et al.*, 2009) (Tableau 15).

Tableau 15: Quelques exemples de teneurs en acide phytique/phytate (en g/100g)

	Teneur en acide phytique/phytate ⁽¹⁾		Teneur en acide phytique/phytate ⁽¹⁾
Céréales : - Maïs - Blé - Riz - Orge - Avoine	0,72 – 2,22 0,39 – 1,35 0,06 – 1,08 0,38 – 1,16 0,42 – 1,16	Graines oléagineuses : - Soja - Graines de lin - Graines de sésame - Graines de colza - Graines de tournesol	1,0 – 2,22 2,15 – 3,69 1,44 – 5,36 2,50 3,9 – 4,3
Légumineuses : - Haricots - Fèves - Pois - Pois chiches - Lentilles	0,61 – 2,38 0,51 – 1,77 0,22 – 1,22 0,28 – 1,60 0,27 – 1,51	Noix : - Cacahuètes - Amandes - Noix - Noix de cajou - Pistaches - Noisettes - Noix de pécan	0,17 – 4,47 0,35 – 9,42 0,20 – 6,69 0,19 – 4,98 0,29 – 2,83 0,23 – 0,92 0,18 – 4,52

⁽¹⁾ dépend des données publiées

La teneur en acide phytique dans les graines de quinoa ne semble donc pas extravagante au regard des autres végétaux utilisés dans l'alimentation humaine, surtout si l'on considère que cet apport en acide phytique se fait dans le cadre d'une alimentation variée et équilibrée. Néanmoins une étude plus approfondie sur les effets d'un apport plus important et régulier en acide phytique par l'intermédiaire d'aliments d'origine végétale doit être menée, en particulier dans les populations à risque comme les femmes enceintes ou celles qui suivent un régime déséquilibré à faible teneur en minéraux et oligo-éléments essentiels.

Les oxalates présentent également une capacité à former des complexes insolubles avec des cations bivalents dans le tractus gastro-intestinal, ceci ayant plusieurs conséquences. Tout d'abord, un apport alimentaire excessif en oxalate entraînera la formation de calculs d'oxalate de calcium (Siener *et al.*, 2006). Ensuite, l'oxalate aura pour effet de réduire l'absorption intestinale de minéraux, en particulier du calcium et du magnésium, et on s'attend à une altération de la biodisponibilité d'un certain nombre d'oligo-éléments (Kelsay et Prather, 1983 ; Heany *et al.*, 1988 ; Bohn *et al.*, 2004).

d. Effet dépressif sur la digestion et l'utilisation des protéines

Les complexes que forment les phytates avec les minéraux peuvent affecter des peptides et des protéines ; conduisant à une biodisponibilité réduite des protéines et une activité enzymatique altérée. Il leur a par exemple été trouvé un effet inhibiteur sur les protéases et les amylases de la région intestinale (Vaintraub et Bulmaga, 1991).

De plus, les phytates exercent un effet négatif direct sur l'utilisation des protéines (et aussi des lipides), un élément préoccupant pour les personnes qui dépendent principalement des aliments dérivés des plantes. En outre, les phytates ont également été rapportés pour former des complexes avec des protéines aux deux valeurs de pH basses et hautes. Ces formations complexes modifient la structure de la protéine, ce qui peut entraîner une diminution de la solubilité de la protéine, de l'activité enzymatique protéolytique et de la digestibilité. (Kumar *et al.*, 2010).

De la même façon, les inhibiteurs de protéase sont capables de former des complexes très stables avec des enzymes protéolytiques, ce qui a pour effet de réduire la digestibilité des protéines alimentaires (Liner et Kakade, 1980 ; Aguirre *et al.*, 2004). Les inhibiteurs de protéase retrouvés dans le quinoa sont des inhibiteurs de trypsine, initialement découverts dans les graines de soja il y a des dizaines d'années.

Cependant, la plupart des renseignements disponibles sur les propriétés et la toxicité des inhibiteurs de trypsine sont le fruit d'expérimentations sur des animaux ou de recherches entreprises *in vitro*. Il est donc difficile de déterminer si ces inhibiteurs de trypsine sont réellement néfastes pour l'Homme. Quoi qu'il en soit, on comprend qu'il soit devenu habituel de prendre les précautions nécessaires pour éliminer ou inactiver les inhibiteurs de trypsine des produits destinés à l'alimentation humaine ; sans compter que les facteurs qui influent sur la digestibilité des protéines sont particulièrement importants dans les aliments pour nourrissons (Berk, 1993 ; Ruales et Nair, 1993b).

Les tanins sont également connus pour interférer avec la digestion et l'absorption chez les animaux monogastriques (Eggum *et al.*, 1983 ; Bach Knudsen *et al.*, 1988). Ils forment non seulement des complexes avec les protéines alimentaires, mais également avec des enzymes digestives, réduisant ainsi la digestibilité des protéines dans les aliments (Singh et Eggum, 1984).

Ces composés polyphénoliques sont particulièrement représentés, en concentrations élevées, dans les coques des céréales et des légumineuses (Schoenlechner *et al.*, 2008). Les plus hautes valeurs en tanins signalées pour les graines de quinoa ne dépassent pas 500 mg/100g et sont considérées trop faibles pour poser un problème sur le plan nutritionnel, bien qu'elles soient légèrement plus élevées que le taux de 0,12% retrouvé dans l'orge (Kent, 1984).

e. 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.

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) (Tableau 16). 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).

Néanmoins, les graines de quinoa contiennent suffisamment d'oxalates pour convenir d'éviter par prudence leur consommation excessive chez les patients atteints d'une maladie lithiase avec hyperoxalurie. La réduction de l'apport alimentaire de calcium entraînant une augmentation de l'absorption intestinale et de l'excrétion urinaire d'oxalate (Von Unruh *et al.*, 2004), ces patients devront également avoir un apport normal en calcium (800 à 1000 mg/jour) afin de limiter l'absorption intestinale d'oxalate. Ce calcium alimentaire devra être ingéré avec les repas afin de maximiser l'effet liant de l'oxalate sur le calcium dans l'intestin (Siener *et al.*, 2006). Cette précaution étant d'autant plus importante dans le cas des personnes

végétariennes ou atteints de maladie cœliaque (ou intolérance au gluten) dont l'apport quotidien en aliments d'origine végétale, dont le quinoa, est beaucoup plus important.

Tableau 16: Concentrations en oxalate d'espèces des familles
Amaranthaceae, Polygonaceae et Chenopodiaceae

Aliment	Type d'échantillon	Moyenne des concentrations en oxalate (mg/100g de partie comestible)	
		Oxalate soluble	Oxalate total
Amaranthaceae : - Amarante	Graines	81,0	232
Polygonaceae : - Sarrasin	Graines	82,2	143
- Rhubarbe	Farine complète	86,0	155
- Oseille	Tiges	380	1235
	Feuilles	258	1391
Chenopodiaceae : - Quinoa	Graines	131	184
- Betterave rouge	Racines	59,3	160
- Blette	Feuilles	327	874
- Epinard	Feuilles	1029	1959

L'apport alimentaire « normal » d'oxalate ayant été estimée dans une gamme de 50 à 200 mg/jour, la prise quotidienne chez les sujets sains d'une portion de 100g de graines de quinoa ne pose aucun problème dans la mesure où aucun autre aliment riche en oxalate n'est apporté (Holmes *et al.*, 1995 ; Siener et Hesse, 2002 ; Siener *et al.*, 2005). Une consommation d'aliments riches en oxalate nécessitera tout de même un approvisionnement suffisant en calcium, en particulier avec du lait ou des produits laitiers maigres (Siener *et al.*, 2006).

e. 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.

Les saponines, par exemple, sont avant tout localisées dans les couches externes de la graine de quinoa, notamment le péricarpe (Galwey *et al.*, 1990 ; Koziol, 1992 ; Ruales et Nair, 1994a,b ; 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.

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).

D. Toxicité

a. 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.

b. Activité lytique

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 structurales 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 sapogénine (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. 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).

VI. 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'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 », un concept qui doit encore être défini par la législation européenne mais promet de répondre aux nouvelles attentes des consommateurs dont l'intérêt pour le lien entre l'alimentation et la santé a considérablement augmenté en Europe. Le quinoa fait ainsi partie intégrante de la stratégie de lutte contre les maladies chroniques mais aussi la faim et la malnutrition. 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.

BIBLIOGRAPHIE

- Abeywardena M.Y., McLeannan P.L., Charnock J.S. (1991). Differential effects of dietary fish oil on myocardial prostaglandin 12 and thromboxane A2 production. *Am. J. Physiol.*, 260, 379-385.
- Abugoch L., Romero N., Tapia C., Silva J., Rivera M. (2008). Study of some physicochemical and functional properties of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) protein isolates. *J. Agric. Food Chem.*, 56(12), 4745-4750.
- Abugoch J.L.E. (2009). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Composition, Chemistry, Nutritional, and Functional Properties. *Adv. Food Nutr. Res.*, 58, 1-31.
- Adolf V.I., Jacobsen S.-E., Shabala S. (2013). Salt tolerance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Environ. Exp. Bot.*, 92, 43-54.
- Agarwal S.K., Rastogi R.P. (1974). Triterpenoid saponins and their genins. *Phytochemistry*, 13(12), 2623-2645.
- Aguirre C., Váldez-Rodríguez S., Mendoza-Hernández G., Rojo-Domínguez A., Blanco-Labra A. (2004). A novel 8,7 kDa protease inhibitor from chan seeds (*Hyptis suaveolens* L.) inhibits proteases from the larger grain borer *Prostephanus truncatus* (Coleoptera: Bostrichidae). *Comp. Biochem. Physiol.*, 138(1), 81-89.
- Ahamed N.T., Singhal R.S., Kulkarni P.R., Mohinder P. (1998). A lesser-known grain, *Chenopodium quinoa*: review of the chemical composition of its edible parts. *Food Nutr. Bull.*, 19(1), 61-70.
- Akande K.E., Doma U.D., Agu H.O., Adamu H.M. (2010). Major antinutrients found in plant protein sources: their effect on nutrition. *Pak. J. Nutr.*, 9(8), 827-832.
- Alvarez-Jubete L., Arendt E.K., Gallagher E. (2009). Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, 60(S4), 240-257.
- Alvarez-Jubete L., Arendt E.K., Gallagher E. (2010a). Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. *Trends Food Sci. Tech.*, 21(2), 106-113.
- Alvarez-Jubete L., Auty M., Arendt E.K. (2010b). Baking properties and microstructure of pseudocereal flours in gluten-free bread formulations. *Eur. Food Res. Technol.*, 230(3), 437-445.
- Andersson S.W., Skinner J., Ellegard L., Welch A.A., Bingham A., Mulligan A., *et al.* (2004). Intake of dietary plant sterols is inversely related to serum cholesterol concentration in men and women in the EPIC Norfolk population: a cross-sectional study. *Eur. J. Clin. Nutr.*, 58(10), 1378-1385.
- Ando H., Chen Y., Tang H., Shimizu M., Watanabe K., Mitsunaga T. (2002). Food components in fractions of quinoa seed. *Food Sci. Technol. Res.*, 8(1), 80-84.
- Asano T.K., McLeod R.S. (2002). Dietary fibre for the prevention of colorectal adenomas and carcinomas. *Cochrane Database Syst. Rev.*, (1).
- Astorg P., Boutron-Ruault M.-C. (2002). Fibres alimentaires et cancer colorectal. *Gastroenterol. Clin. Biol.*, 26(10), 893-912.

- Atwell W.A., Patrick B.M., Johnson L.A., Glass R.W. (1983). Characterization of quinoa starch. *Cereal Chem.*, 60(1), 9-11.
- Bach Knudsen K.E., Munck L., Eggum B.O. (1988). Effect of cooking, pH and polyphenol on carbohydrate composition and nutrition quality of a sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) food, ugali. *Br. J. Nutr.*, 59(1), 31-47.
- Bardella M.T., Fredella C., Prampolini L., Molteni N., Giunta A.M., Bianchi, P.A. (2000). Body composition and dietary intakes in adult celiac disease patients consuming a strict gluten-free diet. *Am. J. Clin. Nutr.*, 72(4), 937-939.
- Barrientos L.G., Murthy P.P.N. (1996). Conformational studies of myo-inositol phosphates. *Carbohydr. Res.*, 296(1-4), 39-54.
- Basu N., Rastogi R.P. (1967). Triterpenoid saponins and sapogenins. *Phytochemistry*, 6(9), 1249-1270.
- Beal L., Mehta T. (1985). Zn and phytate distribution in peas. Influence of heat treatment, germination, pH, substrate, and phosphorous on pea phytate and phytase, *J. Food Sci.*, 50(1), 96-100.
- Berger A., Jones P.J.H., Abumweis S.S. (2004). Plant sterols: factors affecting their efficacy and safety as functional food ingredients. *Lipids Health Dis.*, 3, 5.
- Berghofer E., Schönlechner R. Grain Amaranth. In: Belton P.S., Taylor J.R.N., editors. *Pseudocereals and less common cereals*, Berlin, Germany, Springer, 2002, 219-260.
- Berk Z. *Technologie de production de farines alimentaires et de produits protéiques issus du soja*. FAO, 1993.
- Bertero D., Medan D., Hall A.J. (1996). Changes in apical morphology during floral initiation and reproductive development in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Ann. Bot.*, 78(3), 317-324.
- Bhargava A., Shukla S., Ohri D. (2006). *Chenopodium quinoa*: an Indian perspective. *Ind. Crops Prod.*, 23(1), 73-87.
- Biesiekierski J.R., Muir J.G., Gibson P.R. (2013). Is gluten a cause of gastrointestinal symptoms in people without celiac disease? *Curr. Allergy Asthma Rep.*, 13(6), 631-638.
- Bohn T., Davidsson L., Walczyk T., Hurrell R.F. (2004). Fractional magnesium absorption is significantly lower in human subjects from a meal served with an oxalate-rich vegetable, spinach, as compared with a meal served with kale, a vegetable with a low oxalate content. *Br. J. Nutr.*, 91(4), 601-606.
- Bois J.F., Winkel T., Lhomme J.P., Raffailac J.P., Rocheteau A. (2006). Response of some Andean cultivars of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to temperature: Effects on germination, phenology, growth and freezing. *Eur. J. Agron.*, 25(4), 299-308.
- Bosque S.H., Lemeur R., Van Damme P., Jacobsen S.-E. (2003). Ecophysiological analysis of drought and salinity stress of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Rev. Int.*, 19(1-2), 111-119.
- Brinegar C., Goundan S. (1993). Isolation and characterization of chenopodin, the 11S seed storage protein of quinoa (*Chenopodium quinoa*). *J. Agric. Food Chem.*, 41(2), 182-185.
- Brownawell A.M., Caers W., Gibson G.R., Kendall C.W.C., Lewis K.D., Ringel Y., et al. (2012). Prebiotics and the health benefits of fiber: current regulatory status, future research, and goals. *J. Nutr.*, 142(5), 962-974.

- Bruneton J. (2009). *Pharmacognosie - Phytochimie, plantes médicinales*. 4^{ème} éd. Paris, Tec & Doc, 2009.
- Cai Y., Sun M., Corke H. (2003). Antioxidant activity of betalains from plants of the Amaranthaceae. *J. Agric. Food Chem.*, 51(8), 2288-2294.
- Capriles V.D., Areas J.A.G. (2014). Novel approaches in gluten-free breadmaking: interface between food science, nutrition and health. *Compr. Rev. Food Sci. F.*, 13(5), 871-890.
- Cardozo A., Tapia M. Valor nutritivo. In: Tapia M.E., Gandarillas H., Alandia S., Cardozo A., Mujica A., Ortiz R., et al., editors. *La quinua y la kañiwa: cultivos andinos*. Bogotá, Colombia, Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID), Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA), 1979, 149-192.
- Catacora P., Canahua A. Selección de genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) resistentes a heladas y perspectivas de producción en camellones. Actas del VII Congreso Internacional sobre Cultivos Andinos. 4-8 Fév. 1992, Morales et Vacher, La Paz, Bolivia, 53-56.
- Catassi C., Fasano A. Celiac disease. In: Arendt E.K., Dal Bello F., editors. *Gluten-free cereal products and beverages*. London, Academic Press, 2008.
- Chandel R.S., Rastogi R.P. (1980). Triterpenoid saponins and saponins: 1973-1978. *Phytochemistry*, 19(9), 1889-1908.
- Chauhan G.S., Eskin N.A.M., Tkachuk R. (1992). Nutrients and antinutrients in quinoa seed. *Cereal Chem.*, 69(1), 85-88.
- Chen C.L., Fang H.C., Chou K.J., Wang J.S., Chung H.M. (2001). Acute oxalate nephropathy after ingestion of star fruit. *Am. J. Kidney Dis.*, 37(2), 418-422.
- Cho J.Y., Yoo E.S., Baik K.U., Park M.H., Han B.H. (2001). In vitro inhibitory effect of protopanaxadiol ginsenosides on tumor necrosis factor (TNF)-alpha production and its modulation by known TNF alpha antagonists. *Planta Med.*, 67(3), 213-218.
- Cordeiro L.M.C., Reinhardt V., Baggio C.H., Werner M., Burci L.M., Sasaki G.L., et al. (2012). Arabinan and arabinan-rich pectic polysaccharides from quinoa (*Chenopodium quinoa*) seeds: structure and gastroprotective activity. *Food Chem.*, 130(4), 937-944.
- Cosgrove D.J., Irving G.C.J. *Inositol Phosphates: their chemistry, biochemistry, and physiology*. Amsterdam, Elsevier Scientific Pub. Co., 1980.
- Cuadrado C., Ayet G., Burbano C., Muzquiz M., Camacho L., Cavieres E., et al. (1995). Occurrence of saponins and saponins in Andean crops. *J. Sci. Food Agric.*, 67(2), 169-172.
- Cusack D. (1984). Quinoa : grain of the Incas. *Ecologist*, 14(1), 21-31.
- Danielsen S., Bonifacio A., Ames T. (2003). Diseases of quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Food Rev. Int.*, 19(1-2), 43-59.
- Da-Silva W.S., Harney J.W., Kim B.W., Li J.M., Bianco S.D.C., Crescenzi A., et al. (2007). The small polyphenolic molecule kaempferol increases cellular energy expenditure and thyroid hormone activation. *Diabetes*, 56(3), 767-776.
- Da Silva B.P., Parente J.P. (2010). Chemical properties and antiulcerogenic activity of a galactomannoglucan from *Syagrus oleracea*. *Food Chem.*, 123(4), 1076-1080.

- De Jong N., Plat J., Mensink R.P. (2003). Metabolic effects of plant sterols and stanols (Review). *J. Nutr. Biochem.*, 14(7), 362-369.
- Dinan L., Lafont R. (2006). Effects and applications of arthropod steroid hormones (ecdysteroids) in mammals. *J. Endocrinol.*, 191(1), 1-8.
- Dini N., Rastrilli L., Saturnino P., Schittino A. (1992). A composition study of *Chenopodium quinoa* seeds. *Food / Nahrung*, 36(4), 400-404.
- Dini I., Tenore G.C., Schettino O., Sini A. (2001a). New oleanane saponins in *Chenopodium quinoa*. *J. Agric. Food Chem.*, 49(8), 3976-3981.
- Dini I., Schettino O., Simioli T., Dini A. (2001b). Studies on the constituents of *Chenopodium quinoa* seeds: isolation and characterization of new triterpene saponins. *J. Agric. Food Chem.*, 49(2), 741-746.
- Doublecz K. *Animal nutrition*. Université de Debrecen, Université de Hongrie occidentale, Université de Pannonie, 2011.
- Eggum B.O., Monowar L., Bach K.E., Munck L., Axtell J. (1983). Nutritional quality of sorghum and sorghum foods from Sudan. *J. Cereal Sci.*, 1(2), 127-137.
- Egleti D., Nordlohne S.D., Föste M., Besl M., Linden M.H., Heinz V., *et al.* (2014). Volume and texture improvement of gluten-free bread using quinoa white flour. *J. Cereal Sci.*, 59(1), 41-47.
- Elmadfa I., Kornsteiner M. (2009). Fats and fatty acid requirements for adults. *Ann. Nutr. Metab.*, 55(1-3), 56-75.
- Emsley J., Niazi S. (1981). The structure of myo-inositol hexaphosphate in solution: ³¹P N.M.R. investigation. *Phosphorus Sulfur Silicon Relat. Elem.*, 10(3), 159-171.
- Estrada A., Li B., Laarveld B. (1998). Adjuvant action of *Chenopodium quinoa* saponins on the introduction of antibody responses to intragastric and intranasal administered antigens in mice. *Comp. Immunol. Microbiol. Infect. Dis.*, 21(3), 225-236.
- Fairbanks D.J., Burgener K.W., Robison L.R., Andersen W.R., Ballou E. (1989). Electrophoretic characterization of quinoa seed proteins. *Plant Breeding*, 104(3), 190-195.
- FAO/WHO/UNU (1985). Energy and protein requirements. WHO Technical Report Series 724, Geneva.
- FAO (1998). The role of carbohydrates in nutrition. *Carbohydrates in human nutrition*. Report of a Joint FAO/WHO Expert Consultation. *FAO Food Nutr. Pap.*, Rome, 66.
- FAO (2011). Quinoa: an ancient crop to contribute to world food security. <http://www.fao.org/docrep/017/aq287e/aq287e.pdf>, consulté le 21 novembre 2014.
- FAO (2012). Master plan for the international year of quinoa: A future sown thousands of years ago. http://www.fao.org/alc/file/media/aig/pubs/master_plan.pdf, consulté le 12 février 2015.
- FAO. (2014). Assessment of the International Year of Quinoa 2013. <http://www.fao.org/docrep/meeting/030/mk172E.pdf>, consulté le 9 mai 2015.
- FAO, IFAD, WFP (2014). The state of food insecurity in the world 2014: strengthening the enabling environment for food security and nutrition. <http://www.fao.org/3/a-i4030e.pdf>, consulté le 07 mai 2015.

- Ferreira D.S., Pallone J.A.L., Poppi R.J. (2015). Direct analysis of the main chemical constituents in *Chenopodium quinoa* grain using Fourier transform near-infrared spectroscopy. *Food Control*, 48, 91-95.
- Findeisen E. Ecdysteroides in der menschlichen Nahrung. Th D Pharm, Germany, University of Marburg, 2004.
- Fleming J.E., Galwey N.W. Quinoa (*Chenopodium quinoa*). In: Williams J.T., editor. *Cereals and pseudocereals*. London, UK, Chapman & Hall, 1995, 3-73.
- Foucault A.-S., Lafont R., Dioh W., Fromentin G., Veillet S., Tomé D., *et al.* (2008). Effets d'un extrait de quinoa enrichi en 20-hydroxyecdysone sur l'adiposité dans le cadre du syndrome métabolique. *Nutr. Clin. Metabol.*, 22(S1), p. 103.
- Foucault A.S., Mathe V., Lafont R., Even P., Dioh W., Veillet S., *et al.* (2011). Quinoa extract enriched in 20-hydroxyecdysone protects mice from diet-induced obesity and modulates adipokines expression. *Obesity*, 20(2), 270-277.
- Foucault A.-S., Even P., Lanfont R., Dioh W., Veillet S., Tomé D., *et al.* (2014). Quinoa extract enriched in 20-hydroxyecdysone affects energy homeostasis and intestinal fat absorption in mice fed a high-fat diet. *Physiol. Behav.*, 128, 226-231.
- Gallardo M., Pardo F., Gonzales J. (1996). Efecto del CINa sobre el contenido de betalainas en *Chenopodium quinoa* Willd. XXI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal. 20-22 de marzo, Mendoza, Argentina, 284-285.
- Gallardo M., Gonzalez J.A., Ponessa G. (1997). Morfología del fruto y semilla de *Chenopodium quinoa* Willd (Quinoa). *Chenopodiaceae. Lilloa*, 39(1), 71-80.
- Gallego Villa D.Y., Russo L., Kerbab K., Landi M., Rastrelli L. (2014). Chemical and nutritional characterization of *Chenopodium pallidicaule* (cañihua) and *Chenopodium quinoa* (quinoa) seeds. *Emir. J. Food Agric.*, 26(7), 609-615.
- Galwey N.W., Leakey C.L.A., Price K.R., Fenwick G.R. (1990). Chemical composition and nutritional characteristics of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Sci. Nutr.*, 42F(4), 245-261.
- Gandarillas H. (1968a). Caracteres botánicos más importantes para la clasificación de la quinua. In : Universidad Nacional Técnica del Altiplano, editors. *Anales de la Primera convención de Quenopodiáceas quinoa – cañahua*. Puno, Perú, 41-49.
- Gandarillas H. (1968b). Razas de quinua. Ministerio de Agricultura. División de Investigaciones Agrícolas. *Boletín Experimental* N° 4, La Paz, Bolivia, p. 53.
- Gandarillas H. (1974). Genética y origen de la quinua. Instituto Nacional del Trigo, *Boletín Informativo* N° 9, La Paz, Bolivia, p. 21.
- Gandarillas H. (1979). Botánica. In : Tapia M.E., Gandarillas H., Alandia S., Cardozo A., Mujica A., Ortiz R., *et al.*, editors. *La quinua y la kañiwa: cultivos andinos*. Bogotá, Colombia, Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID), Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA), 20-44.
- Gawlik-Dziki U., Swieca M., Sulkowski M., Dziki D., Baraniak B., Czyz J. (2013). Antioxidant and anticancer activities of *Chenopodium quinoa* leaves extracts – In vitro study. *Food Chem. Toxicol.*, 57, 154-160.
- Gee J.M., Johnson I.T. (1988). Interactions between haemolytic saponins, bile salts and small intestinal mucosa in the rat. *J. Nutr.*, 118(11), 1391-1397.

- Gee J.M., Price K.R., Ridout C.L., Johnson I.T., Fenwick G.R. (1989). Effects of some purified saponins on transmural potential difference in mammalian small-intestine. *Toxicol. In Vitro*, 3(2), 85-90.
- Gee J.M., Price K.R., Ridout C.L., Wortley G.M., Hurrell R.F., Johnson I.T. (1993). Saponins of quinoa (*Chenopodium quinoa*): effects of processing on their abundance in quinoa products and their biological effects on intestinal mucosal tissue. *J. Sci. Food Agric.*, 63(2), 201-209.
- Gerster H. (1997). The potential role of lycopene for human health. *J. Am. Coll. Nutr.*, 16(2), 109-126.
- Ghosh D., Thejomoorthy P., Veluchamy. (1983). Anti-inflammatory and analgesic activities of oleanolic acid 3-/3- glucoside (RDG-1) from *Randia dumetorum* (Rubiaceae). *Indian J. Pharmacol.*, 15(4), 331-342.
- Giusti L. (1970). El genero *Cenopodium* in Argentina 1: Numeros de cromosomas. *Darwiniana*, 16, 98-105.
- Godfray H.C.J, Beddington J.R., Crute I.R., Haddad L., Lawrence D., Muir J.F., *et al.* (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327(5967), 812-818.
- González Martín M.I., Moncada G.W., Fisher S., Escuredo O. (2014). Chemical characteristics and mineral composition of quinoa by near-infrared spectroscopy. *J. Sci. Food Agric.*, 94(5), 876-881.
- Graf B.L., Poulev A., Kuhn P., Grace M., Lila M.A., Raskin I. (2014). Quinoa seeds leach phytoecdysteroids and other compounds with anti-diabetic properties. *Food Chem.*, 163, 178-185.
- Graf B.L., Rojo L.E., Delatorre-Herrera J., Poulev A., Calfio C., Raskin I. (2015a). Phytoecdysteroids and flavonoid glycosides among Chilean and commercial sources of *Chenopodium quinoa*: variation and correlation to physicochemical characteristics. *J. Sci. Food Agric.*, DOI: 10.1002/jsfa.7134.
- Graf B.L., Rojas-Silva P., Rojo L.E., Delatorre-Herrera J., Baldeón M.E., Raskin I. (2015b). Innovations in health value and functional food development of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Compr. Rev. Food Sci. F.*, DOI: 10.1111/1541-4337.12135.
- Grant G., More L.J., McKenzie N.H., Dorward P.M., Buchan W.C., Telek L., *et al.* (1995). Nutritional and haemagglutination properties of several tropical seeds. *J. Agric. Sci.*, 124(3), 437-445.
- Grebenok R.J., Adler J.H. (1993). Ecdysteroid biosynthesis during the ontogeny of spinach leaves. *Phytochemistry*, 33(2), 341-347.
- Gross R., Roch F., Malaga F., De Mirenda A., Scoeneberger H., Trugo L.C. (1989). Chemical composition and protein quality of some Andean food sources. *Food Chem.*, 34(1), 25-34.
- Guignard J.L., Potier P. *Biochimie végétale*. 2^{ème} éd, Paris, Dunod, 2004.
- Gülçin I., Mshvildadze V., Gepdiremen A., Elias R. (2006). The antioxidant activity of a triterpenoid glycoside isolated from the berries of *Hedera colchica*: 3-O-(b-D-glucopyranosyl)-hederagenin. *Phytother. Res.*, 20(2), 130-134.
- Gupta R.K., Gangoliya S.S., Singh N.K. (2013). Reduction of phytic acid and enhancement of bioavailable micronutrients in food grains, *J. Food Sci. Technol.*, 52(2), 676-684.
- Hallberg L., Rossander L., Skanberg A-B. (1987). Phytates and the inhibitory effect of bran on iron absorption in man. *Am. J. Clin. Nutr.*, 45(5), 988-996.

- Hallert C., Grant C., Grehn S., Granno C., Hulten S., Midhagens G., *et al.* (2002). Evidence of poor vitamin status in coeliac patients on a gluten-free diet for 10 years. *Aliment. Pharmacol. Ther.*, 16(7), 1333-1339.
- Hariadi Y., Marandon K., Tian Y., Jacobsen S-E., Shabala S. (2011). Ionic and osmotic relations in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) plant grown at various salinity levels. *J. Exp. Bot.*, 62(1), 185-193.
- Heany R.P., Weaver C.M., Recker R.R. (1988). Calcium absorbability from spinach. *Am. J. Clin. Nutr.*, 47(4), 707-709.
- Hesse A., Siener R., Heynck H., Jahnen A. (1993). The influence of dietary factors on the risk of urinary stone formation. *Scanning Microsc.*, 7(3), 1119-1128.
- Holmes R.P., Goodman H.O., Assimos D.G. (1995). Dietary oxalate and its intestinal absorption. *Scanning Microsc.*, 9(4), 1109-1120.
- Hostettmann K., Marston A. *Saponins*. Cambridge, Cambridge University Press, 2005.
- Hu F., Salmeron J., Manson J., Stampfer M., Colditz G., Rimm E., Willet W. (1999). Dietary fat and risk of type 2 diabetes in women [Abstract]. *Am. J. Epidemiol.*, 149, S1.
- Humphries J.M., Khachik F. (2003). Distribution of lutein, zeaxanthin, and related geometrical isomers in fruit, vegetables, wheat, and pasta products. *J. Agric. Food Chem.*, 51(5), 1322-1327.
- Hunziker A.T. (1943). Los especies alimenticias de Amaranthus y Chenopodium cultivadas por los Indinos de America. *Rev. Argent. Agron.*, 30(4), 297-353.
- Hunziker A.T. *Los pseudocereales de la agricultura indígena de América*. Buenos Aires, Argentina, Acme Agency ,1952.
- Igile G.O. Phytochemical and Biological studies on some constituents of Vernonia amygdalina (compositae) leaves. Th D Pharm, Department of Biochemistry, University of Ibadan, Nigeria, 1996.
- Iglesias-Puig E., Monedero V., Haros M. (2015). Bread with whole quinoa flour and bifidobacterial phytases increases dietary mineral intake and bioavailability. *LWT-Food Sci. Technol.*, 60(1), 71-77.
- Improta F. Kellems R.O. (2001). Comparison of raw, washed and polished quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to wheat, sorghum or maize based diets on growth and survival of broiler chicks. *Livest. Res. Rural Dev.*, 13(1).
- Jacobsen S.E., Stolen O. (1993). Quinoa – Morphology, phenology and prospects for its production as a new crop in Europe. *Eur. J. Agron.*, 2(1), 19-29.
- Jacobsen S.-E., Quispe H., Mujica A. (2001). Quinoa: an alternative crop for saline soils in the Andes. *CIP Report Program 1999-2000*, Lima, Pérou, 403-408.
- Jacobsen S.-E. (2003). The worldwide potential for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Food Rev. Int.*, 19(1-2), 167-177.
- Jacobsen S.-E., Monteros C., Christiansen J., Bravo L., Corcuera L., Mujica A. (2005). Plant responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to frost at various phenological stages. *Eur. J. Agron.*, 22(2), 131-139.
- Jacobsen S.-E., Monteros C., Corcuera L., Bravo L., Christiansen J., Mujica A. (2007). Frost resistance mechanisms in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Europ. Agronomy*, 26(4), 471-475.

- Jancurová M., Minarovicová L., Dandár A. (2009). Quinoa—a Review. *Czech J. Food Sci.*, 27(2), 71-79.
- Jeong S.M., Kang M.J., Choi H.N., Kim J.H., Kim J.I. (2012). Quercetin ameliorates hyperglycemia and dyslipidemia and improves antioxidant status in type 2 diabetic db/db mice. *Nutr. Res. Pract.*, 6(3), 201-207.
- Johnson L.F., Tate M.E. (1969). Structure of phytic acids. *Can. J. Chem.*, 47(1), 63-73.
- Johnson I.T., Gee J.M., Price K., Curl C., Fenwick G.R. (1986). Influence of saponins on gut permeability and active nutrient transport in vitro. *J. Nutr.*, 116(11), 2270-2277.
- Joshi R.C., San Martín R., Saez-Navarrete C., Alarcon J., Sainz J., Antolin M.M., *et al.* (2008). Efficacy of quinoa (*Chenopodium quinoa*) saponins against golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) in the Philippines under laboratory conditions. *Crop Prot.*, 27(3-5), 553-557.
- Kakade M.L., Simons N., Liener I.E. (1969). An evaluation of natural vs. synthetic substrates for measuring the antitryptic activity of soybean samples. *Cereal Chem.*, 46, 518-526.
- Kang J.H., Sung M.K., Kawada T., Yoo H., Kim Y.K., Kim J.S., *et al.* (2005). Soybean saponins suppress the release of proinflammatory mediators by LPS-stimulated peritoneal macrophages. *Cancer Lett.*, 230(2), 219–227.
- Kelsay J.L., Prather E.S. (1983). Mineral balances of human subjects consuming spinach in a lower-fiber diet and in a diet containing fruits and vegetables. *Am. J. Clin. Nutr.*, 38(1), 12-19.
- Kent N.L. *Technology of Cereals*. 3^{ème} éd. Oxford, UK, Pergamon Press, 1984, 125-127.
- Kersten G.F., Spiekstra A., Beuvery E.C., Crommelin D.J. (1991). On the structure of immune-stimulating saponin-lipid complexes (iscoms). *Biochim. Biophys. Acta*, 1062(2), 165-171.
- Kizelsztejn P., Govorko D., Komarnytsky S., Evans A., Wang Z., Cefalu W., *et al.* (2009). 20-Hydroxyecdysone decreases weight and hyperglycemia in a diet induced obesity mice model. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 296(3), 433-439.
- Konishi Y., Hirano S., Tsuboi H., Wada M. (2004). Distribution of minerals in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds. *Biosci. Biotechnol. Biochem.*, 68(1), 231-234.
- Koyro H.-W., Eisa S.S. (2008). Effect of salinity on composition, viability and germination of seeds of *Chenopodium quinoa* Willd. *Plant Soil*, 302(1-2), 79-90.
- Koziol M. (1992). Chemical composition and nutritional evaluation of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *J. Food Compos. Anal.*, 5(1), 35-68.
- Kuljanabhadgavad T., Thongphasuk P., Chamulitrat W., Wink M. (2008). Triterpene saponins from *Chenopodium quinoa* Willd. *Phytochemistry*, 69(9), 1919-1926.
- Kuljanabhadgavad T., Wink M. (2009). Biological activities and chemistry of saponins from *Chenopodium quinoa* Willd.). *Phytochem. Rev.*, 8(2), 473-490.
- Kumar V., Sinha A.K., Makkar H.P.S., Becker K. (2010). Dietary roles of phytates and phytase in human nutrition: a review. *Food Chem.*, 120(4), 945-959.
- Kumpun S., Maria A., Crouzet S., Evrard-Todeschi N., Girault J.-P., Lafont R. (2011). Ecdysteroids from *Chenopodium quinoa* Willd., an ancient Andean crop of high nutritional value. *Food Chem.*, 125(4) 1226-1234.

- Laguna P. (2002). Competitividad, externalidades e internalidades, un reto para les organizaciones economicas campesinas: la inserción de la Asociación Nacional de Productores de Quinoa en el mercado mundial de la quinoa. *Debate Agrario*, 34, 95-169.
- Lamothe L.M., Srichuwong S., Reuhs B.L., Hamaker B.R. (2015). Quinoa (*Chenopodium quinoa* W.) and amaranth (*Amaranthus caudatus* L.) provide dietary fibres high in pectic substances and xyloglucans. *Food Chem.*, 167, 490-496.
- Lampi A.M., Nurmi T., Ollilainen V., Piironen V. (2008). Tocopherols and tocotrienols in wheat genotypes in the healthgrain diversity screen. *J. Agric. Food Chem.*, 56(21), 9716-9721.
- Laus M.N., Gagliardi A., Soccio M., Flagella Z., Pastore D. (2012). Antioxidant activity of free and bound compounds in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds in comparison with durum wheat and emmer. *J. Food Sci.*, 77(11), 1150-1155.
- Lazarte C.E., Carlsson N-G., Almgren A., Sandberg A-S., Grandfeldt Y. (2015). Phytate, zinc, iron and calcium content of common Bolivian food, and implications for mineral bioavailability. *J. Food Compos. Anal.*, 39, 111-119.
- Leeson S., Summers, J.D. *Commercial poultry nutrition*. 3^{ème} éd. Nottingham University Press, 2009.
- Li H., Deng Z., Liu R., Loewen S., Tsao R. (2012). Ultra-performance liquid chromatographic separation of geometric isomers of carotenoids and antioxidant activities of 20 tomato cultivars and breeding lines. *Food Chem.*, 132(1), 508-517.
- Liener I.E., Kakade M.L. Protease inhibitors. In: Liener I.E., editor. *Toxic Constituents of Plant Foodstuffs*. 2^{ème} éd. New York, Academic Press, 1980, 7-71.
- Lis H., Sharon N. (1998). Lectins: Carbohydrate-specific proteins that mediate cellular recognition. *Chem. Rev.*, 98(2), 637-674.
- Loewus F. Biosynthesis of phytate in food grains and seeds. In : Reddy N.R., Sathe S.K., editors. *Food phytates*. Boca Raton, Florida, USA, CRC Press, 2002, 53-61.
- López de Romaña G., Graham G.G., Rojas M., MacLean W.C. Jr. (1981). Digestibility and protein quality of quinoa : comparative study of quinoa (*Chenopodium quinoa*) seed and flour in children. *Arch. Latinoam. Nutr.*, 31(3), 485-497.
- Lorenz K. (1990). Quinoa (*Chenopodium quinoa*) starch: physicochemical properties and functional characteristics. *Starch - Stärke*, 42(3), 81-86.
- Lutz W., Sanderson W., Scherbov S. (2008). The coming acceleration of global population ageing. *Nature*, 451, 716-719.
- Ma W.W., Heinsteinst P.F., McLaughlin J.L. (1989). Additional toxic, bitter saponins from the seeds of *Chenopodium quinoa*. *J. Nat. Prod.*, 52(5), 1132-1135.
- Madl T., Sterk H., Mittelbach M. (2006). Tandem mass spectrometric analysis of a complex triterpene saponin mixture of *Chenopodium quinoa*. *J. Am. Soc. Mass Spectrom.*, 17(6), 795-806.
- Maenz D.D., Endle-Schaan C.M., Newkirk R.W., Classen H.L. (1999). The effect of minerals and mineral chelators on the formation of phytase-resistant and phytase susceptible forms of phytic acid in solution and in a slurry of canola meal. *Anim. Feed Sci. Technol.*, 81(3-4), 177-192.
- Mahoney A., Lopez J., Hendricks D. (1975). Evaluation of the protein quality of quinoa. *J. Agric. Food Chem.*, 23(2), 190-193.

- Makkar H.P., Dawra R.K., Singh B. (1988). Determination of both tannin and protein in a tannin-protein complex. *J. Agric. Food Chem.*, 36(3), 523-526.
- Mariani P., Viti M.G., Montuori M., La Vecchia A., Cipolletta E., Calvani L., *et al.* (1998). The gluten-free diet: a nutritional risk factor for adolescents with celiac disease? *J. Pediatr. Gastroenterol. Nutr.*, 27(5), 519-523.
- Martindale W. *Coca and cocaine: Their history, medical and economic uses, and medicinal preparations*. 3^{ème} éd. London, H. K. Lewis, 1892.
- Martínez E.A., Veas E., Jorquera C., San Martín R., Jara P. (2009). Reintroduction of *Chenopodium quinoa* Willd. into arid Chile : cultivation of two lowland races under extremely low irrigation. *J. Agron. Crop Sci.*, 195(1), 1-10.
- Mastebroek H.D., Limburg H., Gilles T., Marvin H.J.P. (2000). Occurrence of saponin in leaves and seeds of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *J. Sci. Food Agric.*, 80(1), 152-156.
- Mattila P., Astola J., Kumpulainen J. (2000). Determination of flavonoids in plant material by HPLC with diode-array and electro-array detections. *J. Agric. Food Chem.*, 48(12), 5834-5841.
- Mattila P., Pihlava J.-M., Hellstrom J. (2005). Contents of phenolic acids, alkyl- and alkenylresorcinols, and avenanthramides in commercial grain products. *J. Agric. Food Chem.*, 53(21), 8290-8295.
- Mizui F., Kasai R., Ohtani K., Tanaka O. (1988). Saponins from the bran of quinoa, *Chenopodium quinoa* Willd. I. *Chem. Pharm. Bull.*, 36, 1415-1418.
- Mizui F., Kasai R., Ohtani K., Tanaka O. (1990). Saponins from the bran of quinoa, *Chenopodium quinoa* Willd. II. *Chem. Pharm. Bull.*, 38, 375-377.
- Moreau R.A., Whitaker B.D., Hicks K.B. (2002). Phytosterols, phytostanols, and their conjugates in foods: structural diversity, quantitative analysis, and health promoting uses. *Prog. Lipid Res.*, 41(6), 457-500.
- Mota C., Santos M., Mauro R., Samman N., Matos A.S., Torres D., Castanheira I. (2014). Protein content and amino acids profile of pseudocereals. *Food Chem.*, DOI:10.1016/j.food-chem.2014.11.043.
- Mujica A., Izquierdo J., Marathe J.P. (2001). Origen y descripción de la quinua. In : Mujica A., Jacobsen S. E., Izquierdo J., Marathe J. P. y FAO, editors. *Quinua (Chenopodium quinoa Willd.): ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro*. CIP, UNAP. FAO, CD Cultivos Andinos, version 1.0. Santiago, Chile.
- National Research Council. *Lost crops of the Incas: little-known plants of the Andes with promise for worldwide cultivation*. Washington, DC, USA, National Academy Press, 1989, 149-161.
- Navarro P., Giner R.M., Recio M.C., Manes S., Cerda-Nicolas M., Rios J.L. (2001). In vivo anti-inflammatory activity of saponins from *Bupleurum rotundifolium*. *Life Sci.*, 68(10), 1199-1206.
- Ndolo V.U., Beta T. (2013). Distribution of carotenoids in endosperm, germ, and aleurone fractions of cereal grain kernels. *Food Chem.*, 139(1-4), 663-671.
- Nguyen T., Lau D.C.W. (2012). The obesity epidemic and its impact on hypertension. *Can. J. Cardiol.*, 28(3), 326-333.
- Oda K., Matsuda H., Murakami T., Katayama S., Ohgitani T., Yoshikawa M. (2000). Adjuvant and haemolytic activities of 47 saponins derived from medicinal and food plants. *Biol. Chem.*, 381(1), 67-74.

Oelke E.A., Putnam D.H., Teynor T.M., Oplinger E.S. Quinoa. *Alternative field crops manual*. University of Wisconsin-Extension 1992. <https://www.hort.purdue.edu/newcrop/afcm/quinoa.html>, consulté le 22 octobre 2014.

Osborne T.B. *The vegetable proteins*. London, UK, Longmans Greens, 1924.

Oshodi A.A., Ogungbenle H.N., Oladimeji M.O. (1999). Chemical composition, nutritionally valuable minerals and functional properties of benniseed (*Sesamum radiatum*), pearl millet (*Pennisetum typhoides*) and quinoa (*Chenopodium quinoa*) flours. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, 50(5), 325-331.

Ostlund R.E., Racette S.B., Okeke A. (2002). Phytosterols that are naturally present in commercial corn oil significantly reduce cholesterol absorption in humans. *Am. J. Clin. Nutr.*, 75(6), 1000-1004.

Pacheco A., Morlon P. (1978). Los sistemas radicluras de las plantas de interés económico en el Altiplano de Puno : un estudio preliminar. Proyecto de Investigación y Mejoramiento de las condiciones de desarrollo de la Agricultura del Altiplano de Puno, Perú.

Palombini S.V., Claus T., Maruyama S.A., Gohara A.K., Souza A.H.P., de Souza N.E., *et al.* (2013). Evaluation of nutritional compounds in new amaranth and quinoa cultivars. *Food Sci. Technol.*, 33(2), 339-344.

Pasko P., Barton H., Zagrodzki P., Gorinstein S., Folta M., Zachwieja Z. (2009). Anthocyanins, total polyphenols and antioxidant activity in amaranth and quinoa seeds and sprouts during their growth. *Food Chem.*, 115(3), 994-998.

Perez C., Nicklin C., Dangles O., Vanek S., Sherwood S., Halloy S., *et al.* (2010). Climate change in the high Andes: implications and adaptation strategies for small-scale farmers. *Int. J. Environ. Cult. Econ. Soc. Sustain.*, 6(5), 71-88.

Pfeffer W. (1872). Untersuchungen über die Proteincorner und die Bedeutung des Asparagins beim Keimen der Samen. *Jahrb. Wiss. Bot.*, 8, 429-574.

Posternak S. (1903). Sur la constitution de l'acide phosphorganique de réserve des plantes vertes et sur le premier produit de réduction du gaz carbonique dans l'acte de l'assimilation chlorophyllienne. *C. R. Hebd. Seances Acad. Sci.*, 137, 439-441.

Praznik W., Mundigler N., Kogler A., Pelzl B., Huber A. (1999). Molecular background of technological properties of selected starches. *Starch - Stärke*, 51(6), 197-211.

Prego I., Maldonado S., Otegui M. (1998). Seed structure and localization of reserves in *Chenopodium quinoa*. *Ann. Bot.*, 82(4), 481-488.

Price K.R., Johnson I.T., Fenwick G.R. (1987). The chemistry and biological significance of saponins in foods and feedingstuffs. *CRC Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 26(1), 27-135.

Przybylski R., Chauhan G.S., Eskin N.A.M. (1994). Characterization of quinoa (*Chenopodium quinoa*) lipids. *Food Chem.*, 51(2), 187-192.

Qian J.Y., Kuhn M. (1999). Characterization of *Amaranthus cruentus* and *Chenopodium quinoa* starch. *Starch - Stärke*, 51(4), 116-120.

Quetinleclercq J., Elias R., Balansard G., Bassleer R., Angenot L. (1992). Cytotoxic activity of some triterpenoid saponins. *Planta Med.*, 58(3), 279-281.

Quispe J.I., Fernandez C., Cortes G. (1976). Contribución al estudio morfológico del grano de quinua. In : Segunda Convención Internacional de Quenopodiáceas, Potosí, Bolivia.

- Ranhotra G., Gelroth J., Glaser B., Lorenz K., Johnson D. (1993). Composition and protein nutritional quality of quinoa. *Cereal Chem.*, 70(3), 303-305.
- Rea J., Tapia M., Mujica A. Practicas agronomicas. In: Tapia M., Gandarillas H., Alandia S., Cardozo A., Mujica A., Ortiz R., *et al.* editors. *La quinua y la kañiwa: cultivos andinos*. Bogotá, Colombia, Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID), Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA), 1979, 83-120.
- Reichert R.D., Tatarynovich J.T., Tyler R.T. (1986). Abrasive dehulling of quinoa (*Chenopodium quinoa*): effect on saponin content as determined by an adapted hemolytic assay. *Cereal Chem.*, 63(6), 471-475.
- Repo-Carrasco R., Espinoza C., Jacobsen S.-E. (2003). Nutritional value and use of the andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa*) and kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*). *Food Rev. Int.*, 19(1-2), 179-189.
- Repo-Carrasco-Valencia R., Hellström J.K., Pihlava J.-M., Mattila P.H. (2010). Flavonoids and other phenolic compounds in Andean indigenous grains: Quinoa (*Chenopodium quinoa*), kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) and kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Food Chem.*, 120(1), 128-133.
- Repo-Carrasco-Valencia R.A.-M., Serna L.A. (2011). Quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willd.) as a source of dietary fiber and other functional components. *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, 31(1), 225-230.
- Risi C.J., Galwey N.W. (1984). The Chenopodium grains of the Andes: Inca crops for modern agriculture. *Adv. Appl. Biol.*, 10, 145-216.
- Risi J., Galwey N.W. Chenopodium grains of the Andes: a crop for the temperate latitudes. In: Wickens, G.E., Haq, N., Dauy, P., editors. *New Crops for Food and Industry*. New York, Chapman and Hall, 1989.
- Romero J.A. Evaluación de las características físicas, químicas y biológicas de ocho variedades de quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willd). Th MSc, Universidad de San Carlo de Guatemala, 1981.
- Ruales J., Nair B.M. (1993a). Content of fat, vitamins and minerals in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) seeds. *Food Chem.*, 48(2), 131-136.
- Ruales J., Nair B.M. (1993b). Saponins, phytic acid, tannins and protease inhibitors in quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willd) seeds. *Food Chem.*, 48(2), 137-143.
- Ruales J., Nair B.M. (1994a). Properties of starch and dietary fibre in raw and processed quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willd.) seeds. *Plant Foods Hum. Nutr.*, 45(3), 223-246.
- Ruales J., Nair B.M. (1994b). Effect of processing on in vitro digestibility of protein and starch in quinoa seeds. *Int. J. Food Sci. Tech.*, 29(4), 449-456.
- Ryan E., Galvin K., O'Connor T.P., Maguire A.R., O'Brien N.M. (2007). Phytosterol, squalene, tocopherol content and fatty acid profile of selected seeds, grains, and legumes. *Plant Foods Hum. Nutr.*, 62(3), 85-91.
- Sandberg A.S., Brune M., Carlsson N.G., Hallberg L., Skoglund E., Rossander-Hulthen L. (1999). Inositol phosphates with different number of phosphate groups influence iron absorption in humans. *Am. J. Clin. Nutr.*, 70(2), 240-246.
- San Martín R., Ndjoko K., Hostettmann K. (2008). Novel molluscicide against *Pomacea canaliculata* based on quinoa (*Chenopodium quinoa*) saponins. *Crop Prot.*, 27(3-5), 310-319.

- Savage G.P., Vanhanen L., Mason S.M., Ross A.B. (2000). Effect of cooking on the soluble and insoluble oxalate content of some New Zealand foods. *J. Food Compos. Anal.*, 13(3), 201-206.
- Schlemmer U., Frolich W., Prieto R.M., Grases F. (2009). Phytate in foods and significance for humans: food sources, intake, processing, bioavailability, protective role and analysis. *Mol. Nutr. Food Res.*, 53(S2), 330-375.
- Schoenlechner R., Siebenhandl S., Berghofer E. Pseudocereals. In: Arendt E.K., Bello F.D., editors. *Gluten-free cereal products and beverages*. Academic Press, 2008, 149-190.
- Schulze E., Winterstein E. (1896). Ein Nachtrag zu der Abhandlung über einen phosphorhaltigen Bestandteil der Pflanzensamen. *Z. Physiol. Chem.*, 40, 120-122.
- Seidlová-Wuttke D., Ehrhardt C., Wuttke W. (2010). Metabolic effects of 20-OH-ecdysone in ovariectomized rats. *J. Steroid Biochem. Mol. Biol.*, 119(3-5), 121-126.
- Shewry P.R. The major seed storage proteins of spelt wheat, sorghum, millets and pseudocereals. In: Belton P.S., Taylor J.R.N., editors. *Pseudocereals and Less Common Cereals*, Germany, Springer, 2002, 1-24.
- Siener R., Hesse A. (2002). The effect of different diets on urine composition and the risk of calcium oxalate crystallisation in healthy subjects. *Eur. Urol.*, 42(3), 289-296.
- Siener R., Schade N., Nicolay C., Von Unruh G.E., Hesse A. (2005). The efficacy of dietary intervention on urinary risk factors for stone formation in recurrent calcium oxalate stone patients. *J. Urol.*, 173(5), 1601-1605.
- Siener R., Hönow R., Seidler A., Voss S., Hesse A. (2006). Oxalate contents of species of the Polygonaceae, Amaranthaceae and Chenopodiaceae families. *Food Chem.*, 98(2), 220-224.
- Singh U., Eggum B.O. (1984). Factors affecting the quality of pigeonpea (*Cajanus cajan* L.) *Plant Food Hum. Nutr.*, 34(4), 273-283.
- Singh R.R., Rao A.G. (2002). Reductive unfolding and oxidative refolding of a Bowman-Birk inhibitor from horsegram seeds (*Dolichos biflorus*): evidence for 'hyperreactive' disulfide bonds and rate-limiting nature of disulfide isomerization in folding. *Biochim. Biophys. Acta*, 1597, 280-291.
- Small E. (2013). Quinoa-is the United Nations' featured crop of 2013 bad for biodiversity? *Biodiversity*, 14(3), 169-79.
- Sparg S.G., Lighth M.E., Van Staden J. (2004). Biological activities and distribution of plant saponins. *J. Ethnopharmacol.*, 94 (2-3), 219-243.
- Stafford H.A. (1994). Anthocyanins and betalains: Evolution of the mutually exclusive pathways. *Plant Sci.*, 101(2), 91-98.
- Steffolani M.E., León A.E., Pérez G.T. (2013). Study of the physicochemical and functional characterization of quinoa and kañiwa starches. *Starch - Stärke*, 65(11-12), 976-983.
- Stuardo M., San Martín R. (2008). Antifungal properties of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) alkali treated saponins against *Botrytis cinerea*. *Ind. Crop Prod.*, 27(3), 296-302.
- Sugano M., Goto S., Yaoshida K., Hashimoto Y., Matsuo T., Kimoto M. (1993). Cholesterol-lowering activity of various undigested fractions of soybean protein in rats. *J. Nutr.*, 120(9), 977-985.

- Suh N., Honda T., Finlay H.J., Barchowsky A., Williams C., Benoit N.E., *et al.* (1998). Novel triterpenoids suppress inducible nitric oxide synthase (iNOS) and inducible cyclooxygenase (COX-2) in mouse macrophages. *Cancer Res.*, 58(4), 717-723.
- Tabekhia, M.M., Luh, B.S. (1980). Effect of germination, cooking, and canning on phosphorous and phytate retention in dry beans. *J. Food Sci.*, 45(2), 406-408.
- Tanaka L.Y.A., Oliveira A.J.B., Gonçalves J.E., Cipriani T.R., Souza L.M., Marques M.C.A., *et al.* (2010). An arabinogalactan with anti-ulcer protective effects isolated from *Cereus peruvianus*. *Carbohydr. Polym.*, 82(3), 714-721.
- Tang H., Yoshida T., Watanabe K., Mitsunaga T. (1998). Some properties of starches granules in various plants. *Bulletin of the Institute for Comprehensive Agricultural Sciences, Kinki University*, 6, 83-89.
- Tang H., Watanabe K., Mitsunaga T. (2002). Characterization of storage starches from quinoa, barley and adzuki seeds. *Carbohydr. Polym.*, 49(1), 13-22.
- Tang Y., Li X., Chen P.X., Zhang B., Hernandez M., Zhang H., *et al.* (2015a). Characterisation of fatty acid, carotenoid, tocopherol/tocotrienol compositions and antioxidant activities in seeds of three *Chenopodium quinoa* Willd. genotypes. *Food Chem.*, 174, 502-508.
- Tang Y., Li X., Zang B., Chen P.X., Liu R., Tsao R. (2015b). Characterisation of phenolics, betanins and antioxidant activities in seeds of three *Chenopodium quinoa* Willd. genotypes. *Food Chem.*, 166, 380-388.
- Tapia M.E., Gandarillas H., Alandia S., Cardozo A., Mujica A., Ortiz R., *et al.* *La quinua y la kañiwa: cultivos andinos*. Bogotá, Colombia, Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID), Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA), 1979.
- Tapia M.E. *Cultivos andinos subexplotados y su aporte a la alimentación*. 2^{ème} éd. Santiago, Chile, FAO, 1997.
- Tapia M.E., 2000. Cultivos andinos subexplotados y su aporte a la alimentación. In : Mujica, A., Jacobsen, S. E., Izquierdo, J., Marathe, J. P. y FAO, editors. *Quinoa (Chenopodium quinoa Willd.): ancestral cultivo andino, alimento del presente y futuro*. CIP, UNAP. FAO, CD Cultivos Andinos, version 1.0. Santiago, Chile.
- Tapia M.E., Fries A.M. *Guía de campo de los cultivos andinos*. FAO y ANPE. Lima, Perú 2007. <http://www.fao.org/docrep/010/ai185s/ai185s.pdf>, consulté le 3 décembre 2014.
- Thompson T. (1999). Thiamin, riboflavin, and niacin contents of the gluten free diet: is there cause for concern? *J. Am. Diet. Assoc.*, 99(7), 858-862.
- Thompson T., Dennis M., Higgins L.A., Lee A.R., Sharrett M.K. (2005). Gluten-free diet survey: are Americans with coeliac disease consuming recommended amounts of fibre, iron calcium and grain foods? *J. Hum. Nutr. Diet.*, 18(3), 163-169.
- Tilman D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R., Polasky S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677.
- Tyler V.E., Brady L.R., Robbers J.E. . *Pharmacognosy*. 8^{ème} éd. Philadelphia, Lea and Febiger, 1981.
- USDA. (2005). USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Release 27. Nutrient Data Laboratory Home Page, http://www.ars.usda.gov/main/site_main.htm?modecode=80-40-05-25, consulté le 5 janvier 2015.

USDA (2015). USDA National Nutrient Database for Standard Reference, Release 27. Nutrient Data Laboratory Home Page, http://www.ars.usda.gov/main/site_main.htm?modecode=80-40-05-25, consulté le 5 janvier 2015.

Vaintraub I., Bulmaga V. (1991). Effect of phytates on the in vitro activity of digestive proteinases. *J. Agric. Food Chem.*, 39(5), 859-861.

Valcárcel-Yamani B., Da Silva Lannes S.C. (2012). Applications of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and amaranth (*Amaranthus* spp.) and their influence in the nutritional value of cereal based foods. *Food Public Health*, 2(6), 265-275.

Valencia-Chamorro S.A. Quinoa. In : Cabalero B. 2^{ème} éd. *Encyclopedia of Food Science and nutrition* (vol. 8), Amsterdam, Academic Press, 2003, 4895-4902.

Vats P., Banerjee U.C. (2004). Production studies and catalytic properties of phytases (myo-inositol-hexakis-phosphate phosphohydrolases): an overview. *Enzyme Microb. Technol.*, 35, 3-14.

Vega-Galvez, A., Miranda, M., Vergara J., Uribe E., Puente L., Martinez E.A. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), an ancient Andean grain: A review. *J. Sci. Food Agric.*, 90(15), 2541-2547.

Von Unruh G.E., Voss S., Sauerbruch T., Hesse A. (2004). Dependence of oxalate absorption on the daily calcium intake. *J. Am. Soc. Nephrol.*, 15(6), 1567-1573.

Voutquenne L., Lavaud C., Massiot G., le Men-Olivier L. (2002). Structure–activity relationships of haemolytic saponins. *Pharm. Biol.*, 40(4), 253-262.

Weihrauch J.L., Gardner J.M. (1978). Sterol content of foods of plant origin. *J. Am. Diet. Assoc.*, 73(1), 39-47.

Wilson C., Read J.J., Abo-Kassem E. (2002). Effect of mixed-salt salinity on growth and ion relations of a quinoa and a wheat variety. *J. Plant Nutr.*, 25(12), 2689-2704.

Wink M. Phytochemical diversity of secondary metabolites. In: Goodman R.M., editor. *Encyclopedia of plants & crop science*. New York, Marcel Dekker, 2004, 915-919.

Winterstein E. (1897). Über einen phosphorhaltigen Pflanzenbestandteil, welcher bei der Spaltung Inosit liefert. *Berichte Deutsch Chem. Ges.*, 30, 2299-2302.

Wise A. (1995). Phytate and zinc bioavailability. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, 46(1), 53-63.

Woldemichael G., Wink M. (2001). Identification and biological activities of triterpenoid saponins from *Chenopodium quinoa*. *J. Agric. Food Chem.*, 49(5), 2327-2332.

Wright K.H., Pike O.A., Fairbanks D.J., Huber S.C. (2002). Composition of *Atriplex hortensis*, sweet and bitter *Chenopodium quinoa* seeds. *Food Chem. Toxicol.*, 67(4), 1383-1385.

Yao Y., Yang X., Shi Z., Ren G. (2014). Anti-inflammatory activity of saponins from quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds in lipopolysaccharide-stimulated RAW 264.7 macrophages cells. *J. Food Sci.*, 79(5), 1018-1023.

Zevallos V.F., Ellis H.J., Suligoj T., Herencia L.I., Ciclitira P.J. (2012). Variable activation of immune response by quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) prolamins in celiac disease. *Am. J. Clin. Nutr.*, 96(2), 337-344.

Zimmet P.Z., Magliano D.J., Herman W.H., Shaw J.E. (2014). Diabetes: a 21st century challenge. *Lancet Diabetes Endocrinol.*, 2(1), 56-64.

Zhu N., Kikusaki H., Vastano B.C., Nakatani N., Karwe M.V., Rosen R.T., *et al.* (2001). Ecdysteroids of quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.). *J. Agric. Food Chem.*, 49(5), 2576-2578.

Zhu N., Sheng S., Sang S., Jhoo J.-W., Bai N., Karwe M., *et al.* (2002). Triterpene saponins from debittered quinoa (*Chenopodium quinoa*) seeds. *J. Agric. Food Chem.*, 50(4), 865-867.

Sites consultés :

http://www.ars.usda.gov/main/site_main.htm?modecode=80-40-05-25

<http://www.fao.org/quinoa-2013/fr/>

http://biochim-agro.univ-lille1.fr/proteines/co/Module_Proteines.html

<http://www.eufic.org/article/fr/expid/basics-aliments-fonctionnels/>

Thèses consultées :

Gouvernel L. Le *Chenopodium quinoa*. Th D Pharm, Université de Paris XI, 1996.

Dentone I. Le Quinoa. Th D Pharm, Université Claude Bernard de Lyon I, 2005.

Lebonvallet S. Implantation du quinoa et simulation de sa culture sur l'altiplano bolivien. Th D Agronomie, Agro Paris Tech, 2008.

SERMENT DE GALIEN

Je jure d'honorer ceux qui m'ont instruit dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle à leur enseignement.

D'exercer dans l'intérêt de la Santé publique ma profession avec conscience et de respecter non seulement la législation en vigueur mais aussi les règles de l'Honneur, de la Probité et du Désintéressement.

De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers le malade et sa dignité humaine.

De ne dévoiler à personne les secrets qui m'auraient été confiés ou dont j'aurais eu connaissance dans l'exercice de ma Profession.

En aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser les actes criminels.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses.

Que je sois méprisé de mes Confrères si je manque à mes engagements.



HERBILLON Marie

Le quinoa : intérêt nutritionnel et perspectives pharmaceutiques

Th. D. Pharm., Rouen, 2015, 125 p.

RESUME :

Le quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) est une plante herbacée de la famille des Amaranthaceae. Originare 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 ». Domesticqué il y a plusieurs milliers d'années par les peuples autochtones, le quinoa a longtemps représenté un aliment de subsistance précieux, avant de sombrer dans l'oubli au moment de la conquête espagnole au XV^{ème} siècle.

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. Cependant, il a pour désavantage de présenter des substances dites « antinutritionnelles » qui influent de façon négative sur la croissance, la digestion et l'utilisation des aliments ; et 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.

Nous proposons d'exposer les aspects botaniques et les différentes étapes de la redécouverte de cette culture ancestrale ; mais surtout de procéder à un examen actualisé complet de la composition chimique et de la valeur nutritionnelle des graines de quinoa. Nous répertorions les principales propriétés pharmacologiques et nutritionnelles des composés bioactifs, et étudierons les effets des substances antinutritionnelles tout en discutant des différents moyens mis en œuvre pour les éliminer. En mettant en avant les nombreux bienfaits de cet aliment, ce travail a pour vocation d'étayer l'importance qu'il pourrait avoir dans l'avenir pour le Monde entier, en particulier dans la lutte contre la faim et la malnutrition ; mais aussi d'évoquer son potentiel en tant qu'aliment fonctionnel dans le combat contre les maladies de civilisation de plus en plus fréquentes.

MOTS CLES : quinoa – protéine– saponine – gluten – aliment fonctionnel

JURY :

Président : Mme SEGUIN Elisabeth, Professeur en Pharmacognosie

Membres : Mr ELOMRI Abdelhakim, Maître de conférences en Pharmacognosie

Mme AUBER Pascale, Pharmacienne

DATE DE SOUTENANCE : 25 juin 2015