

Année 2017

N° 005

THÈSE
pour le
DIPLÔME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN PHARMACIE

par

Clémence DRENO

Présentée et soutenue publiquement le 21 Mars 2017

**L'enrichissement alimentaire avec la graine de lin :
une solution nutritionnelle pour rééquilibrer le
rapport Oméga 6/ Oméga 3**

Président : Mr El-Hassane NAZIH, maître de conférences de Biochimie

Membres du jury : Mme Delphine CARBONNELLE, maître de conférences de
Physiologie
Mme Véronique HEINE, Pharmacienne titulaire

Remerciements

A mon président de thèse, Monsieur El-Hassane NAZIH, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury de thèse. Je vous remercie sincèrement.

A ma directrice de thèse, Madame Delphine CARBONNELLE, qui m'a fait l'honneur de diriger mon travail. Merci pour votre disponibilité, pour vos conseils et surtout pour votre gentillesse.

A mon autre jury de thèse, Madame Véronique HEINE, qui a accepté de participer à cette thèse en tant que membre du jury. Merci de votre pédagogie et de votre patience.

Je remercie également :

Mes parents, qui m'ont beaucoup soutenu tout au long de ce travail. A ma mère pour les relectures, les reformulations et les corrections, à mon père pour la mise en page... mille mercis !

Mes grands-parents ; ma mamie Isabelle, avec qui j'ai formé une colocation pendant quelques mois, et mes grands-parents Christiane et René qui vont pouvoir mettre une nouvelle thèse sur l'étagère !

Doudou, pour être resté avec moi des journées entières à me soutenir. Je ne lui laissais pas trop le choix non plus... !

Cette thèse clôture ces belles années de faculté :

Merci à ma binôme de TP, gomar, on était un duo d'enfer !

Merci à toutes mes copines chéries, les dindes (Julie, Claire, Alix, Mailis), les poulettes (Margaux, Pépé, Camille, Alix, Marine, Constance), heureusement que vous êtes là !

Merci à toutes mes équipes de voyages, Camille, Charlotte, Romain et Clément pour le Cambodge et Camille, Marine et Doudou pour le Bénin. Je n'oublierai jamais ce que l'on a vécu pendant ces quelques mois, j'ai vraiment adoré !

Merci à ma copine de toujours, momo, que je vais bientôt rejoindre pour de nouvelles aventures.

Merci à Adrien, qui a beaucoup entendu parler de ma thèse pendant 6 mois... c'est bon c'est fini !!

REMERCIEMENTS.....	1
LISTE DES FIGURES.....	6
LISTE DES TABLEAUX.....	7
LISTE DES ABREVIATIONS.....	9
INTRODUCTION.....	11
CHAPITRE 1 : GENERALITES.....	12
1. CLASSIFICATION.....	12
2. DESCRIPTION BOTANIQUE.....	12
3. PRODUCTION ET CULTURE.....	14
3.1 PAYS PRODUCTEURS.....	14
3.2 CULTURE.....	14
3.3 DIFFERENTES VARIETES.....	15
3.4 DEBOUCHES DU LIN OLEAGINEUX.....	15
3.4.1. LA GRAINE.....	15
3.4.2. LA PAILLE DE LIN.....	16
4. COMPOSITION PHYTOCHIMIQUE.....	17
4.1 L'HUILE DE LIN.....	17
4.2 LES POLYSACCHARIDES.....	18
4.3 LES LIGNANES.....	18
4.4 LES HETEROSIDES CYANOGENETIQUES.....	18
CHAPITRE 2 : PROPRIETES PHARMACOLOGIQUES DE LA GRAINE DE LIN.....	19
1. LES MUCILAGES.....	19
1.1 PROPRIETES LAXATIVES.....	19
1.2 PROPRIETES ANTI-INFLAMMATOIRES.....	20
1.3 PROPRIETES REVULSIVES.....	20
2. L'HUILE DE LA GRAINE DE LIN, RICHE EN ACIDE A-LINOLENIQUE.....	21
3. LES LIGNANES.....	21
3.1 ENTEROLIGNANES ET MENOPAUSE.....	22
3.2 ENTEROLIGNANES ET CANCERS.....	23
3.2.1 CANCER DU COLON.....	23
3.2.2 CANCER DU SEIN.....	23
3.2.3 CANCER DE LA PROSTATE.....	24
CHAPITRE 3 : GENERALITES ET PHYSIOLOGIE DES ACIDES GRAS.....	25
1. RAPPEL SUR LES ACIDES GRAS ET LEUR METABOLISME.....	25
1.1 STRUCTURE.....	25
1.2 NOMENCLATURE.....	26
1.3 LES DIFFERENTES FAMILLES D'ACIDES GRAS.....	27
1.3.1. LES ACIDES GRAS SATURES.....	27
1.3.2. LES ACIDES GRAS MONO-INSATURES.....	27
1.3.3. LES ACIDES GRAS POLYINSATURES.....	27
2. BIODISPONIBILITE DES ACIDES GRAS.....	27
2.1 ABSORPTION DES ACIDES GRAS.....	27
2.2 PARAMETRES DE L'ABSORPTION.....	28
3. PRINCIPALES FONCTIONS EXERCEES PAR LES ACIDES GRAS POLYINSATURES.....	29

3.1	ROLE ENERGETIQUE	30
3.2	ROLE STRUCTURAL	30
3.3	PRECURSEURS DE MOLECULES BIOACTIVES	31
3.3.1	SYNTHESE DE DERIVES A LONGUE CHAINE.....	31
3.3.2	COMPETITION ENZYMATIQUE	32
3.3.3	SYNTHESE DE MEDiateURS LIPIDIQUES.....	33
3.3.4	ROLES DES MEDiateURS LIPIDIQUES.....	34
3.4	MODULATEURS DE LA TRANSCRIPTION GENIQUE.....	35
4.	SOURCES DES ACIDES GRAS ESSENTIELS LA ET ALA.....	37
4.1	SOURCE EN ACIDE A-LINOLENIQUE (ALA).....	37
4.2	SOURCE EN ACIDE LINOLEIQUE (LA).....	38
5.	CONSOMMATION ALIMENTAIRE ACTUELLE EN ACIDES GRAS ESSENTIELS.....	38
5.1	OUTILS UTILISES	38
5.1.1.	LES ANC.....	38
5.1.2.	L'ETUDE INCA ₂	39
5.2	CONSOMMATION LIPIDIQUE EN FRANCE.....	39
5.3	CONSOMMATION ALIMENTAIRE EN ALIMENTS RICHES EN ACIDE A-LINOLENIQUE (ALA)	40
5.3.1.	APPORTS QUOTIDIENS REELS ET COMPARAISON AVEC LES ANC	40
5.3.2.	ALIMENTS CONTRIBUTEURS.....	40
5.4	CONSOMMATION ALIMENTAIRE EN ALIMENTS RICHES EN ACIDE LINOLEIQUE (LA)	42
5.4.1.	APPORTS QUOTIDIENS REELS ET COMPARAISON AVEC LES ANC	42
5.4.2.	ALIMENTS CONTRIBUTEURS.....	42
5.5	RAPPORT LA/ALA.....	43
6.	CONSEQUENCES D'UN RAPPORT OMEGA 6/ OMEGA3 DESEQUILIBRE	45
6.1.	IMPACTS PHYSIOLOGIQUES.....	45
6.1.1.	INFLAMMATION DE BAS GRADE	45
6.1.2.	HYPERPLASIE ADIPOCYTAIRE.....	45
6.1.3.	HYPERLIPIDEMIE.....	46
6.1.4.	INSULINO-RESISTANCE.....	46
6.2.	PATHOLOGIES ASSOCIEES	47
6.2.1.	SURPOIDS ET OBESITE	47
6.2.2.	DIABETE DE TYPE 2	47
6.2.3.	PATHOLOGIES NEUROLOGIQUES	47
6.2.4.	PATHOLOGIES CARDIOVASCULAIRES.....	48
6.2.5.	PATHOLOGIES INFLAMMATOIRES.....	49
6.2.6.	CANCERS.....	49
CHAPITRE 4 : VERS UNE ALIMENTATION SANTE.....		51
1.	ÉVOLUTION DU COMPORTEMENT ALIMENTAIRE	51
1.1	ÉVOLUTION DE 1950 A 1980.....	51
1.2	ÉVOLUTION DE 1980 A 2005.....	52
1.2.1.	CONSOMMATION DE MASSE.....	52
1.2.2.	ASSIETTE INDUSTRIELLE ET « MALBOUFFE »	53
1.3	VERS UNE ALIMENTATION « SANTE »	54
1.3.1.	MESURES DE SANTE PUBLIQUE	55
1.3.2.	AUTRES FACTEURS INFLUENTS.....	55
2.	LES ALLEGATIONS	57
2.1	GENERALITES ET DEFINITION.....	57
2.2	REGLEMENTATION CONCERNANT LES ALLEGATIONS SUR LES ACIDES GRAS OMEGA 3	58
2.2.1.	ALLEGATIONS NUTRITIONNELLES.....	58
2.2.2.	ALLEGATIONS DE SANTE	59
3.	AUGMENTER SA CONSOMMATION EN OMEGA 3.....	61
3.1	LES VEGETAUX.....	61

3.2	LES ANIMAUX MARINS.....	62
3.3	LES COMPLEMENTS ALIMENTAIRES.....	63
3.3.1	STRUCTURE CHIMIQUE.....	63
3.3.2	MATRICE.....	64
3.3.3	FORMULATION GALENIQUE ET CONSERVATION.....	64

CHAPITRE 5 : L'ENRICHISSEMENT 66

1.	ENRICHISSEMENT DIRECT.....	66
1.1	MATIERES PREMIERES ANIMALES.....	66
1.2	MATIERES PREMIERES VEGETALES.....	66
1.2.1	L'HUILE DE LIN ET DE COLZA.....	66
1.2.2	LA GRAINE DE LIN ENTIERE.....	67
1.2.3	LA FARINE DE LIN.....	68
2.	ENRICHISSEMENT INDIRECT.....	68
2.1	DENREES ALIMENTAIRES ENRICHIES.....	68
2.2	MODALITES D'ENRICHISSEMENT.....	70
2.2.1.	LES ANIMAUX MONOGASTRIQUES ET POLYGASTRIQUES.....	70
2.2.2.	LES VECTEURS D'ENRICHISSEMENT.....	70
2.3	LES ANIMAUX MONOGASTRIQUES.....	70
2.3.1.	LES VOLAILLES.....	73
2.3.2.	LES ŒUFS.....	74
2.3.3.	LE LAPIN.....	75
2.4	LES ANIMAUX POLYGASTRIQUES.....	75
2.4.1.	LA VIANDE DE BŒUF.....	75
2.4.2.	LE LAIT DE VACHE.....	76
2.4.3.	ASPECT ENVIRONNEMENTAL ET BOVINS.....	77
3.	BIODISPONIBILITE DES PRODUITS OBTENUS APRES ENRICHISSEMENT.....	78
3.1	ENRICHISSEMENT DIRECT.....	78
3.2	ENRICHISSEMENT INDIRECT.....	78
4.	RISQUES DE L'ENRICHISSEMENT.....	79
4.1	RISQUE DE SUREXPOSITION A L'ACIDE A-LINOLENIQUE.....	79
4.2	RISQUE INTRINSEQUE DE L'UTILISATION DE LA GRAINE DE LIN.....	80
4.3	RISQUE LIE A L'OXYDATION DES ACIDES GRAS OMEGA 3.....	80
4.4	RISQUE LIE AUX METABOLITES SECONDAIRES.....	81
5.	LES LIMITES DE L'ENRICHISSEMENT.....	81
5.1	REPETITION DE LA QUALITE NUTRITIONNELLE.....	81
5.2	PERFORMANCE DE L'ANIMAL.....	82
5.3	LIMITE SENSORIELLE.....	82
5.4	LIMITES NUTRITIONNELLES.....	82
5.5	MARKETING.....	82
6.	EXEMPLE D'UNE FILIERE LIN EN FRANCE : L'ASSOCIATION BLEU BLANC CŒUR.....	84
6.1.	PRESENTATION.....	84
6.2.	UNE DEMARCHE BASEE SUR DES ETUDES SCIENTIFIQUES.....	84
6.2.1.	1ERE ETUDE CLINIQUE.....	84
6.2.2.	2EME ETUDE CLINIQUE.....	85
6.2.3.	3EME ETUDE CLINIQUE.....	85
6.2.4.	4EME ETUDE CLINIQUE.....	86
6.2.5.	5EME ETUDE CLINIQUE.....	86
6.3.	LES PRODUITS BLEU-BLANC-CŒUR (BBC).....	86

CONCLUSION 88

BIBLIOGRAPHIE..... 89

Liste des figures

Figure 1 : Planche ancienne de <i>Linum usitatissimum</i>	13
Figure 2 : Capsules et graines de lin.....	13
Figure 3 : Principaux pays producteurs de lin oléagineux en 2010.....	14
Figure 4 : Répartition des débouchés des graines de lin issues de la collecte enquêtée en 2009 par l'Onidol	15
Figure 5 : Complément alimentaire « graines de lin » du laboratoire Arkopharma.....	20
Figure 6 : Autoplasme Vaillant du laboratoire SERP	20
Figure 7 : Caractéristiques structurales communes entre l'œstradiol et l'entérodiol (Lainé et al., 2007).....	22
Figure 8 : Exemples de compléments alimentaires « Ymea » et « Féminabiane », retrouvés en Pharmacie pour soulager les symptômes de la ménopause.....	23
Figure 9 : Structure des différentes familles d'acides gras (Guesnet et al., 2005)	26
Figure 10 : Schéma de la digestion et de l'absorption des lipides chez l'homme.....	28
Figure 11 : Les acides gras Oméga 3 : de l'alimentation à l'incorporation tissulaire (Schuchardt and Hahn, 2013)	29
Figure 12 : Principales fonctions exercées par les acides gras (Guesnet et al., 2005).....	31
Figure 13 : Bioconversion de LA et ALA en acides gras à longues chaînes (Calder, 2013)	32
Figure 14 : Voies de biosynthèse des acides gras de la famille des Oméga 3 et des Oméga 6 et des éicosanoïdes (Guesnet et al., 2005).....	33
Figure 15 : Voies métaboliques de la cyclo-oxygénase et de la lipoxygénase (Guesnet et al., 2005).....	34
Figure 16 : Représentation schématique des effets des AGPI sur la transcription de gènes au niveau des hépatocytes et des adipocytes (Guesnet et al., 2005)	36
Figure 17 : Représentation schématique des interactions entre les macrophages et les adipocytes lors d'une augmentation de la masse du tissu adipeux (Calder et al., 2011).....	46
Figure 18 : Coupe schématique d'une artère saine et d'une artère athéroscléreuse (Koulikoff, 2014).....	49
Figure 19 : Évolution de la consommation de différents aliments entre 1950 et en 1990, en kg/an/habitant, selon les données de l'annuaire statistique de la France.....	52
Figure 20 : Évolution des dépenses en euros de différents aliments par habitant en France (INSEE, 2000).....	53
Figure 21 : Évolution du surpoids en % de la population en France et dans les pays développés (OCDE)	54
Figure 22 : Évolution de la perception du lien entre la santé et l'alimentation dans un panel de 1000 Français entre 2013 et 2016.....	54
Figure 23 : Représentation de l'acte alimentaire selon l'âge, en % en 2008, (Escalon et al., 2009).....	56
Figure 24 : Évolution de la consommation de viande dans les pays développés et les pays en voie de développement (FAO, 2009).....	69
Figure 25 : Principaux produits d'origine animale consommés en 2013 (Planetoscope).....	71
Figure 26 : Effet d'un régime riche en graines de lin extrudées sur la composition en ALA de produits de charcuterie, par rapport à un régime témoin et un régime riche en graines de tournesol (Guillevic et al., 2007).....	73

Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition chimique de la graine de lin (Bruneton, 2016).....	17
Tableau 2 : Composition en acides gras de l'huile de lin.....	17
Tableau 3 : Aliments les plus riches en acide α -linoléique (Table Ciqual, 2016)	37
Tableau 4 : Aliments les plus riches en acide linoléique (Table Ciqual, 2016)	38
Tableau 5 : Apport nutritionnel conseillé (ANC) en acide gras définis en 2010.....	39
Tableau 6 : Apports quotidiens en acide α -linoléique (ALA) et proportion des sujets ayant un apport satisfaisant en ALA (Anses, 2015)	40
Tableau 7 : Aliments contributeurs aux apports en acide α -linoléique (ALA) chez les Français.....	41
Tableau 8 : Apport quotidien en acide linoléique (LA) des adultes et des enfants d'après INCA 2.....	42
Tableau 9 : Aliments contributeurs aux apports en acide linoléique (LA) chez les Français.....	43
Tableau 10 : Ratio moyen en LA/ALA des individus français et proportion des sujets ayant un ratio supérieur ou égal aux recommandations.....	44
Tableau 11 : Reconnaissance des messages sanitaires concernant l'alimentation, exprimée en % (Rajohanasa et al., 2009)	55
Tableau 12 : Historiques des crises alimentaires en France dans l'ordre chronologique (Hebel, 2016).....	57
Tableau 13 : Allégations nutritionnelles concernant les acides gras Oméga 3 (Règlement (CE) n°116/2010, 2010)	59
Tableau 14 : Allégations de santé concernant les acides gras Oméga 3 (Règlement (CE) n°432/2012, 2012)	60
Tableau 15 : Compositions des huiles en LA, ALA et rapport LA/ALA (Table Ciqual, 2016).....	62
Tableau 16 : Rapport LA/ALA de margarines enrichies ou non enrichies	67
Tableau 17 : Apport en ALA et % des ANC pour une ration journalière en lipides visibles (Couedelo, 2011).....	67
Tableau 18 : Comparaison des teneurs en Oméga 3 et du rapport Oméga 6/ Oméga 3 entre un rôti de porc issu d'un porc standard et d'un porc enrichi (Bleu-Blanc- Coeur, 2016)	72
Tableau 19 : Composition et teneurs en acides gras de deux régimes expérimentaux chez des porcs (AGS : Acides gras saturés, AGM : Acides gras mono-insaturés, AGPI : Acides gras polyinsaturés) (Guillevic et al., 2007).....	72
Tableau 20 : Comparaison de la teneur en Oméga 3 et du rapport Oméga 6 / Oméga 3 entre poulet entier standard et d'un poulet entier enrichi (Bleu-Blanc-Coeur, 2016)	73
Tableau 21 : Comparaison de la teneur en acides gras des œufs issus d'une filière standard et des œufs issus d'une filière lin.....	74
Tableau 22 : Comparaison des teneurs en matières grasses, acide gras Oméga 3 et rapport Oméga 6/Oméga 3 entre une côte basse d'un bœuf standard et d'un bœuf enrichi (Bleu-Blanc-Coeur, 2016).....	76
Tableau 23 : Comparaison des teneurs en matières grasses, en acide gras Oméga 3 et du rapport Oméga 6/ Oméga 3 entre un lait standard et un lait enrichi (Bleu-Blanc- Coeur, 2016)	77

Tableau 24 : Diminution de la production de méthane en fonction du pourcentage de graines de lin dans la ration alimentaire des ruminants (Martin et al., 2009)	78
Tableau 25 : Formes d'apport en DHA et accréation tissulaire chez le rat (Valenzuela et al., 2005).....	79

Liste des abréviations

AA : Acide arachidonique
AESA : Apport Energétique Sans Alcool
AFSSA : Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (ancien Anses)
AGM : Acide gras mono-insaturé
AGPI : Acide gras polyinsaturé
AGT : Acides gras totaux
AGS : Acide gras saturé
ALA : Acide α -linoléique
ANC : Apport nutritionnel conseillé
ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ANSM : Agence Nationale de Sécurité du Médicament et des produits de santé
AOV : Antioxydant végétal
BBC : Bleu-Blanc-Cœur
CE : Commission Européenne
CLA : Acide linoléique conjugué
CSHPF : Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France
COX : Cyclo-oxygénase
CREDOC : Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie
DGLA : Acide dihomogamma-linoléique
DHA : Acide docosahexaénoïque
ED : Entérodiol
EE : Ethyl ester
EL : Entérolactone
EPA : Acide éicosapentaénoïque
ER : Estrogen Receptor
EFSA : European Food Safety Authority
FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
IL : Interleukine
INCA : Etude individuelle nationale des consommations alimentaires
INPES : Institut national de prévention et d'éducation pour la santé
LA : Acide linoléique
LDL : Lipoprotéine
LOX : lipoxygénases
OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques
ONIDOL : Organisation Nationale Interprofessionnelle des Oléagineux
PG : Prostaglandine
PGI : Prostacyclines
PL : Phospholipide
PNNS : Programme National de Nutrition et Santé
PPAR : Peroxysome Proliferator Activated Receptors
SDG : Sécoisolaricirésinol diglucoside
SERM : Spécific Estrogen Receptor Modulators

TAG : Triacylgcérols
TG : Triglycéride
TNF : Facteur de nécrose tumorale
TX : Thromboxanes
VLDL : Lipoprotéine

Introduction

Le rapport Oméga 6/ Oméga 3 est actuellement considéré comme déterminant pour s'assurer du bon fonctionnement de l'organisme. Les différents acides gras constitutifs de ces deux familles modulent en effet des processus physiologiques, comme l'inflammation ou l'adipogénèse. Ils contrôlent en partie la prévalence de grandes maladies telles que les maladies cardiovasculaires, le diabète, l'obésité ou encore le cancer, pathologies en pleine extension dans nos sociétés occidentales.

Longtemps proche de 1/1, le rapport Oméga 6/ Oméga 3 augmente de manière continue depuis ces dernières années, jusqu'à atteindre 25/1 dans nos sociétés actuelles. Nos habitudes alimentaires sont les principales causes du déséquilibre de ce rapport, en faveur des acides gras Oméga 6. Il s'explique en partie par une surconsommation de produits céréaliers et d'huiles, riches en acides gras Oméga 6, associée à une sous-consommation en acides gras Oméga 3. Les régimes animaux, principalement composés de maïs et de soja, riches en Oméga 6 contribuent activement à ce déséquilibre.

Diminuer le ratio Oméga 6/ Oméga 3 est devenu un problème de santé publique. Il s'agit d'augmenter les apports en acides gras Oméga 3 et/ou de diminuer les apports en acides gras Oméga 6 pour rééquilibrer le rapport Oméga 6/ Oméga 3. Après avoir présenté les généralités sur les acides gras polyinsaturés et leurs rôles physiologiques, nous verrons comment la graine de lin, riche en acide α -linoléinique peut être une solution efficace pour augmenter et diversifier les sources en acides gras Oméga 3 dans l'alimentation. Elle constitue une source économique fiable et durable en acides gras Oméga 3. Nous développerons les bienfaits de son utilisation dans l'alimentation humaine, puis dans l'alimentation animale via le concept de l'enrichissement.

Chapitre 1 : Généralités

1. Classification

DIVISION Magnoliophyta (Angiospermes)

CLASSE Magnoliopsida (Dicotylédones)

SOUS-CLASSE Rosidae

ORDRE Linales

FAMILLE Linaceae

GENRE *Linum*

ESPÈCE *Linum usitatissimum* (espèce cultivée actuellement)

Cette classification est essentiellement basée sur des critères anatomiques et morphologiques (Guignard, 2015).

2. Description botanique

Linum usitatissimum est l'espèce majoritairement cultivée de nos jours. Elle regroupe de nombreuses variétés, principalement sélectionnées pour leur productivité en fibres et en graines. Le lin cultivé est une plante herbacée annuelle, constituée d'une tige unique et d'une racine pivotante (Figure 1), qui se ramifie en radicelles fibreuses pouvant atteindre 9 à 12 cm (Diederichsen and Richards, 2003).

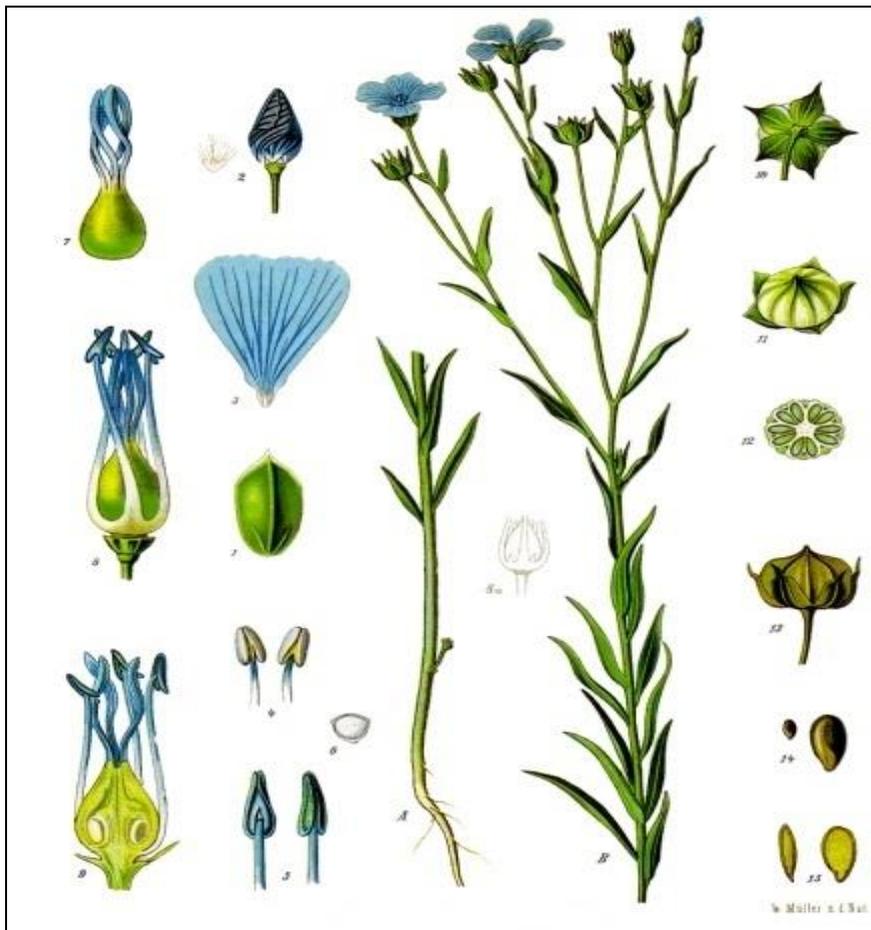


Figure 1 : Planche ancienne de *Linum usitatissimum*

Ses feuilles sont simples, alternes et lancéolées. Les fleurs pentamères à pétales bleus sont solitaires, portées par des ramifications grêles de la tige. Le fruit est une capsule à 10 loges monoséminées (Figure 2). La graine de lin est allongée, ovoïde, aplatie ($4-6 \times 2-3 \times 1,5-2$ mm), arrondie à l'une de ses extrémités et pointue à l'autre (Bruneton, 2009). Son tégument est brun-rouge foncé (Figure 2), lisse, brillant et finement ponctué en surface (loupe). Le hile forme une légère dépression près de l'extrémité en pointe. Les parois externes de l'épiderme sont mucilagineuses.



Figure 2 : Capsules et graines de lin

Réduite en poudre et observée au microscope, la graine se compose de cellules du tégument externe, de cellules collenchymateuses arrondies associées à une assise de cellules scléreuses allongées, de cellules polygonales pigmentées en orange brun, de

parenchyme, d'albumen et de cotylédons renfermant des grains d'aleurone et de nombreuses gouttelettes d'huile isolées (Bruneton, 2016).

3. Production et culture

3.1 Pays producteurs

La culture du lin est une culture mineure avec moins de 1% des surfaces totales d'oléagineux cultivés dans le monde. En 2013, la production mondiale de graines de lin s'élevait à 2,3 millions de tonnes. Le principal pays producteur est le Canada, qui représente à lui seul 38% de la production mondiale, soit 745000 tonnes/an en 2010, suivi de la Chine, représentant 18% avec 353000 tonnes/an (Figure 3). L'Union Européenne ne représente que 4% de la production mondiale, avec 80000 à 100000 tonnes/an. La France est le 3ème pays producteur de l'Union Européenne après l'Angleterre et la Belgique. La culture du lin est principalement concentrée dans les régions Centre et Nord-Ouest (Labalette et al., 2011).

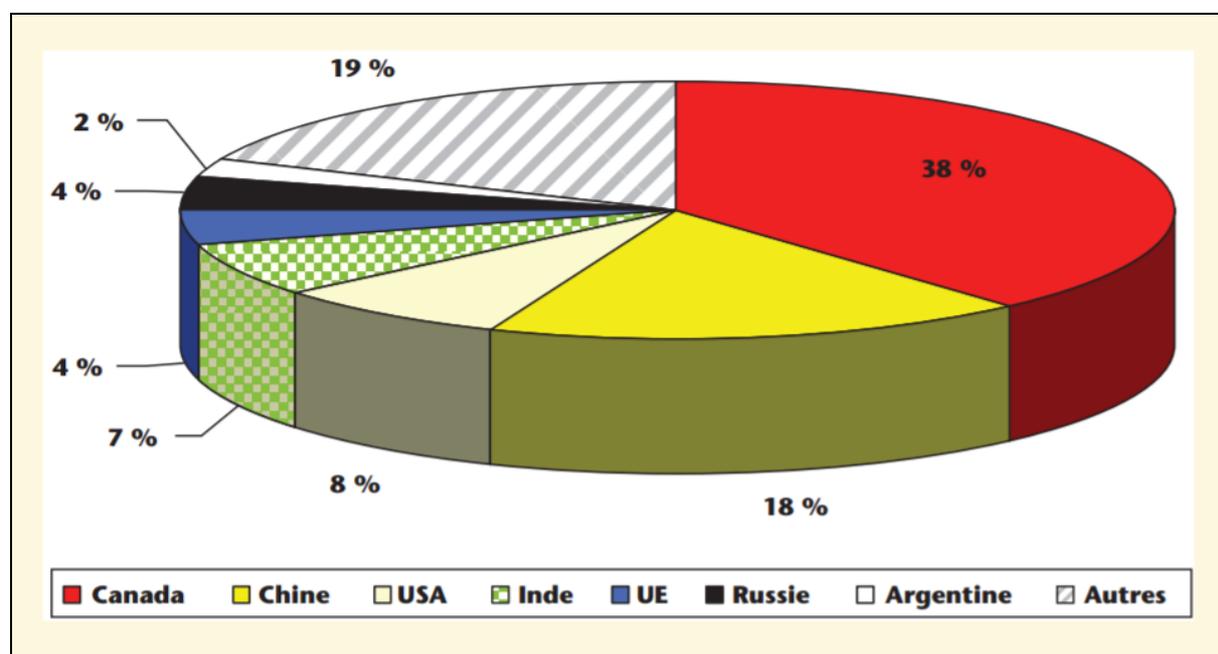


Figure 3 : Principaux pays producteurs de lin oléagineux en 2010

3.2 Culture

Le lin est une des plus anciennes plantes cultivées. Tout est valorisé dans le lin, d'où son nom, *Linum usitatissimum*, qui signifie étymologiquement que tout est utile dans le lin. Au fil du temps, les hommes ont sélectionné différentes variétés de l'espèce *Linum usitatissimum*, dans le but d'améliorer le rendement en fibres ou en graines. Les modifications portaient sur la hauteur des plantes pour obtenir une fibre plus longue, ou encore sur le nombre de ramifications pour augmenter la quantité de capsules (Nichterlein, 2003).

Le lin est une espèce végétale à cycle court : 100 jours en moyenne sont nécessaires pour sa croissance. Sa culture respecte l'écosystème, et ne nécessite que très peu d'intrants (produits phytosanitaires et engrais) et d'eau (l'eau de pluie est suffisante). À

titre indicatif, la culture du coton demande cinq fois plus d'intrants que celle du lin et quasiment deux fois plus d'eau (400 mm pour le lin versus 700 mm pour le coton) (Onidol, 2009).

3.3 Différentes variétés

Il existe deux types de variétés de lin oléagineux : le lin d'hiver, qui résiste au froid, et le lin de printemps dont la culture nécessite plus de chaleur. Le lin d'hiver est récolté entre début juillet et mi-août tandis que le lin de printemps est récolté entre mi-juillet et début septembre. En France, 28 variétés de lin cultivables sont inscrites au catalogue français 2010, dont 20 types de variétés de printemps et 8 types de variétés d'hiver. Les variétés d'hiver représentent actuellement 80% de la production française.

Les variétés se distinguent génétiquement et géographiquement par leur teneur en huile, qui peut varier de 38 à 45% et notamment leur teneur en acide α -linoléique (ALA) qui varie entre 51,5% et 66,2% pour un lin de printemps et entre 54% et 70,2% pour un lin d'hiver (Labalette and Legros, 2013).

La culture du lin s'oriente de plus en plus vers un marché de qualité, avec une valorisation de la teneur et de la qualité de l'huile contenue dans la graine (Labalette et al., 2011).

3.4 Débouchés du lin oléagineux

3.4.1. La graine

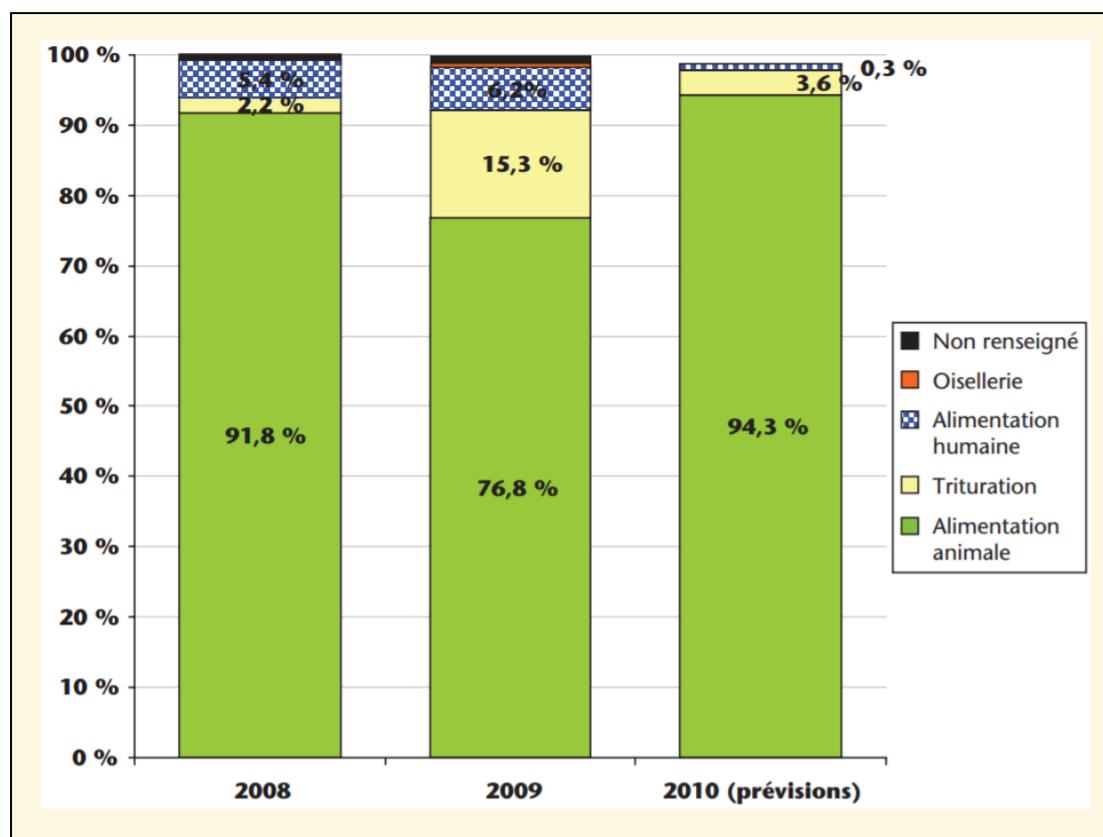


Figure 4 : Répartition des débouchés des graines de lin issues de la collecte enquêtée en 2009 par l'Onidol

Le principal débouché (94%) de la graine de lin est l'alimentation animale, en raison de ses qualités nutritionnelles (Figure 4) (Charrier et al., 2013). Ce chapitre sera développé par la suite. La graine de lin est aussi utilisée pour son huile, très sensible à l'oxydation ce qui lui confère des propriétés siccatives très intéressantes en industrie. L'huile de lin est utilisée pour la fabrication du linoléum (revêtement de sol), de peintures ou encore d'encre à séchage rapide. L'huile est obtenue par broyage de la graine de lin, combinant des mouvements de forte pression et de frottement (trituration). Cette utilisation industrielle a cependant largement diminué ces dernières années, au profit de son utilisation dans l'alimentation animale (Weill and Mairesse, 2010). L'utilisation de la graine de lin dans l'alimentation humaine reste anecdotique en 2010 (Figure 4).

3.4.2. La paille de lin

La paille de lin est un coproduit de la culture de la graine, qui est aussi valorisée. Elle a en effet profité du nouvel essor des fibres végétales dans l'incorporation aux matériaux composites et dans l'écoconstruction, en réponse aux objectifs écologiques de plus en plus exigeants de notre époque (Hallonet, 2016). Les fibres de lin sont utilisées dans le secteur du sport, du transport ou encore du bâtiment. Outre leur potentiel renouvelable et leur faible bilan CO₂, elles possèdent des qualités intéressantes : performances mécaniques, légèreté, capacité d'amortissement des vibrations, d'isolation thermique et phonique. On retrouve ainsi la fibre de lin dans différents secteurs (Bono et al., 2015) :

-le secteur du sport et des loisirs : les fibres de lin sont utilisées pour leur faible densité (1.45g/cm³ versus 2.55g/cm³ pour les fibres de verre) et pour leur efficacité à absorber les vibrations, en comparaison des fibres de carbone et de verre. Les raquettes de tennis, les casques de vélo ou encore les surfs séduisent déjà le grand public ; le confort est amélioré, les douleurs musculaires et ligamentaires ont tendance à diminuer.

-le secteur du bâtiment : les écrans de sous toiture à base de lin assurent une imperméabilité de l'habitat, tandis que les laines de lin offrent une isolation thermique et acoustique de qualité supérieure à la laine de verre. De plus, la fibre de lin absorbe le CO₂ circulant, et laisse respirer l'habitat. Ces écrans peuvent être mélangés à chaud avec des résines, pour former des panneaux de bois agglomérés ou des portes coupe-feu (propriétés ignifuges), présentant de bonnes qualités d'isolement thermique et acoustique. L'écoconstruction a comme objectif de diminuer la consommation énergétique des bâtiments, dans un souci environnemental, tout en garantissant le confort et la santé des occupants. À partir de 2020, tous les bâtiments construits en France devront avoir un bilan énergétique positif. Forte de ses performances techniques et de ses qualités écologiques (fibre naturelle, 100% biodégradable), la fibre de lin est de plus en plus recherchée chez des consommateurs écoresponsables. Les fibres de lin sont aussi valorisées dans l'aménagement, sous forme de sanitaires, de dalles intérieures ou extérieures, de chaises, tables, bureaux...

-le secteur des transports : Le secteur automobile profite lui aussi des avantages des fibres de lin. Les composites à base de lin associent légèreté et résistance pour la construction de panneaux de portière (Citroën, Peugeot, Smart), tableaux de bord (Opel Astra, Zafira) ou encore des tablettes arrières. Les véhicules ainsi construits sont moins lourds et engendrent une diminution significative de la consommation de carburant. De plus, depuis 2009, les constructeurs automobiles doivent se soumettre aux exigences de la norme Euro 5 de la Commission Européenne: 95% des voitures commercialisées en

Europe en 2015 doivent être recyclables. La fibre de lin est un composé naturel, écologique et biodégradable qui répond parfaitement à cette norme. Les matériaux composites à base de lin sont toujours en Recherche et Développement pour rentrer dans la composition des avions et des trains. L'intérêt qu'il suscite ne fait aucun doute : des engins plus légers engendreraient un gain de vitesse et d'énergie (Nguyen, 2015) !

4. Composition phytochimique

Le tableau ci-dessous (Tableau 1) présente l'ensemble des composés de la graine de lin.

Tableau 1 : Composition chimique de la graine de lin (Bruneton, 2016)

Composition	Graine de lin
Huile	35-40%
Protéines	20-25%
Polysaccharides	Jusqu'à 10%
Vitamines et minéraux	Non renseigné
Hétérosides cyanogénétiques	Traces
Glucosides de lignanes	Traces

4.1 L'huile de lin

L'huile de lin vierge est obtenue par pression à froid des graines mûres de *Linum Usitatissimum*. L'acide gras α -linoléique (ALA) est l'acide gras majoritaire. Il représente 35% de la composition totale de l'huile (Tableau 2) (Shim et al., 2015).

Tableau 2 : Composition en acides gras de l'huile de lin

Composition	Huile de lin
Acide α -linoléique	35-36%
Acide linoléique	11-24%
Acide oléique	11-35%
Acide palmitique	3-8%
Acide stéarique	2-8%
Autres	1%

L'huile de lin est une huile très insaturée et pauvre en tocophérols (antioxydants naturels), ce qui la rend extrêmement sensible à la lumière, à l'humidité et à l'air (Morin, 2015).

4.2 Les polysaccharides

Les polysaccharides de la graine de lin forment des mucilages, constitués d'une fraction neutre et d'une fraction acide. La fraction neutre se compose d'un arabinoxylane ramifié, composé de D-xylose, de L-arabinose, de D-glucose et de D-galactose. La fraction ramifiée se compose de L-rhamnose et d'acide D-galacturonique. Grâce aux fibres, l'indice de gonflement de la graine est supérieur à 4, celui de la drogue pulvérisée est supérieur à 4,5 (Bruneton, 2016).

4.3 Les lignanes

Les glucosides de lignanes retrouvés dans la graine de lin sont le sécoisolaricirésinol, le matairésinol, le pinorésinol et le laricirésinol (Thompson et al., 2006). Ce sont des composés phénoliques du monde végétal. Ils ont un rôle de défense dans la plante : de nombreuses études ont en effet décrit des propriétés anti-bactériennes, anti-fongiques et anti-virales (Imran et al., 2015). Le principal lignane de la graine de lin est le sécoisolaricirésinol, retrouvé sous forme de diglucoside (SDG) (Blecker et al., 2012). Sa concentration dans la graine de lin est 75 à 800 fois plus grande que dans toutes les autres sources végétales. On estime la concentration de SDG dans la graine et la farine de lin entre 0,3% et 1,9%, et dans l'huile de lin à 0,1% (Touré and Xueming, 2010).

4.4 Les hétérosides cyanogénétiques

Les hétérosides cyanogénétiques retrouvés dans la graine de lin sont la linustatine, environ 207mg/100g de graine de lin, la néolinustatine, environ 174mg/100g et la linamaroside (Park et al., 2005). Ce sont des substances capables d'engendrer, en cas d'absorption, du cyanure d'hydrogène. La dose toxique est atteinte par l'ingestion d'une quantité très importante de graine de lin. L'organisme humain détoxifie rapidement par action enzymatique les cyanures en thiocyanates, qui seront éliminés dans les urines (Bruneton, 2016). Dans le cadre d'une ingestion de graine de lin, le conseil supérieur d'hygiène publique de France a estimé que ces composés ne présentaient pas de danger s'ils étaient incorporés à hauteur de 5% de l'alimentation totale.

-La culture du lin est propre (nécessite peu d'intrants) et éco-responsable.

-L'alimentation animale est le principal débouché de la graine de lin.

-La paille de lin est valorisée en matériaux composites, performants dans l'industrie.

-La graine de lin est riche en composés pharmacologiquement actifs.

Chapitre 2 : Propriétés pharmacologiques de la graine de lin

1. Les mucilages

1.1 Propriétés laxatives

La Pharmacopée Européenne définit les plantes médicinales comme des drogues végétales lorsqu'une partie de cette plante présente des propriétés médicamenteuses. La graine de lin mûre et sèche constitue une drogue (Ph Européenne, 2013).

La présence de mucilages dans la graine de lin justifie son emploi comme laxatif de lest (Singh et al., 2011). Les mucilages de la graine de lin gonflent au contact de l'eau et forment un gel volumineux. L'absorption de ce gel permet d'augmenter la masse et l'hydratation du bol fécal, ce qui exerce une action dite de lest et stimule le péristaltisme (Greenwald et al., 2001). Au niveau du côlon, une partie des fibres subissent une fermentation et favorisent de ce fait le maintien de la flore bactérienne.

En France, l'ancienne agence du médicament (AFSSA) admet qu'il est possible de revendiquer l'indication « traitement symptomatique de la constipation » pour la graine de lin (Figure 5). La notice du médicament contenant de la graine de lin doit faire mention de plusieurs éléments explicatifs:

-La posologie : 10 à 15 grammes de graines de lin dans 150 ml de liquide, 2 à 3 fois par jour, pendant 3 jours si nécessaire (Ph Européenne, 2013).

-Les conditions d'utilisation : Les graines de lin diminuent l'absorption de certains oligo-éléments (fer, zinc, calcium magnésium) et certains médicaments (psychotropes). On respectera donc un délai de 1 à 2h entre la prise de ces médicaments et celle de graines de lin.

-Mises en garde spéciales : Ne pas utiliser chez la femme enceinte ou allaitante, ni chez l'enfant de moins de 12 ans.

-Précautions d'emploi : Boire une quantité suffisante d'eau pendant le traitement. En cas de douleurs abdominales, fièvre, gonflement du ventre, consulter un médecin.

-Contre-indications : Mégacôlon, occlusion intestinale, paralysie intestinale, pathologies inflammatoires de l'intestin, saignements non diagnostiqués, difficulté de déglutition ou affection œsophagienne.

-Effets indésirables : Météorisme intestinal

-Conseils : Le traitement à base de graine de lin doit être occasionnel et les doses ne doivent pas être augmentées sans avis médical. La consommation de fibres dans l'alimentation, d'une quantité suffisante d'eau et la pratique d'une activité physique peuvent suffire pour traiter une constipation passagère liée au mode de vie.



Figure 5 : Complément alimentaire « graines de lin » du laboratoire Arkopharma

La médecine traditionnelle utilise aussi les graines de lin pour traiter des pathologies inflammatoires et respiratoires.

1.2 Propriétés anti-inflammatoires

Les mucilages de la graine de lin auraient aussi des propriétés anti-inflammatoires. Le gel formé avec l'eau recouvrirait la muqueuse digestive et la protégerait des processus inflammatoires comme les brûlures d'estomac ou les phases de colite chez des patients souffrants du syndrome de côlon irritable (Bruneton, 2016).

1.3 Propriétés révulsives

Un mélange de farine de lin et de poudre de graines de moutarde est utilisé pour confectionner des cataplasmes révulsifs (Figure 6). Appliqués sur le dos, le thorax ou la gorge, ils seraient efficaces pour traiter les maux de gorge, la toux grasse et soulager les symptômes respiratoires des bronchites et des pneumonies (Source codex 1908).

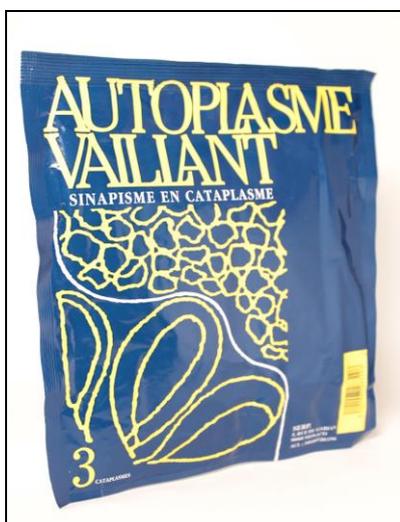


Figure 6 : Autoplasme Vaillant du laboratoire SERP

Cette utilisation, comme celle des mucilages pour traiter les inflammations de la muqueuse digestive, ne reposent sur aucune donnée scientifique solide. De plus, la farine de lin rancit rapidement sans adjonction d'antioxydant.

2. L'huile de la graine de lin, riche en acide α -linoléinique

L'huile de lin vierge est depuis peu inscrite à la Pharmacopée Européenne. La consommation de l'huile de lin, extraite de la graine de lin fut longtemps proscrite. En effet, la France disposait depuis 1973 d'une interdiction réglementaire concernant les usages de l'huile de lin, en raison de son potentiel toxique. Le Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPPF), autorité de l'époque, considérait que l'instabilité de l'huile et son risque d'oxydation étaient suffisamment important pour considérer son usage comme toxique et donc interdit (Morin, 2015). L'évolution des connaissances scientifiques concernant les acides gras, et notamment les acides gras Oméga 3, dont fait partie l'acide α -linoléinique (ALA) a permis une réévaluation de son usage. En 2009, l'AFSSA a permis la consommation de l'huile de lin, sous conditions spécifiques (Annexe 1) : L'huile de lin raffinée est autorisée comme ingrédient en mélange dans les huiles alimentaires et les matières grasses tartinables. Son étiquetage doit mentionner « ne pas utiliser pour la friture », et son conditionnement doit être opaque et sous azote pour éviter sa dégradation (Bruneton, 2016). La conservation de l'huile de lin reste difficile et son utilisation se développe peu, malgré l'intérêt porté pour l'acide α -linoléinique (ALA). De nouveaux procédés industriels se sont alors développés pour permettre l'utilisation de l'ALA de la graine de lin, sous une autre forme que l'huile, difficilement utilisable. Ce chapitre sera développé par la suite.

3. Les lignanes

Après ingestion de la graine de lin, le SDG contenu dans la graine est métabolisé par la flore gastro-intestinale en deux molécules bioactives appelées entérolignanes: l'entérodol (ED) et l'entérolactone (EL) (Li et al., 2012). La structure chimique de ces entérolignanes est semblable à celle des œstrogènes naturels, en particulier l'entérodol et l'œstradiol. On retrouve des similarités dans les groupements phénols et hydroxyls (Figure 7) : ce sont des phyto-œstrogènes. Ce type de structure similaire à celle des œstrogènes naturels explique la faible affinité des entérolignanes pour les récepteurs aux œstrogènes ; on parle de SERM (specific estrogen receptor modulators) (Adlercreutz, 2007).

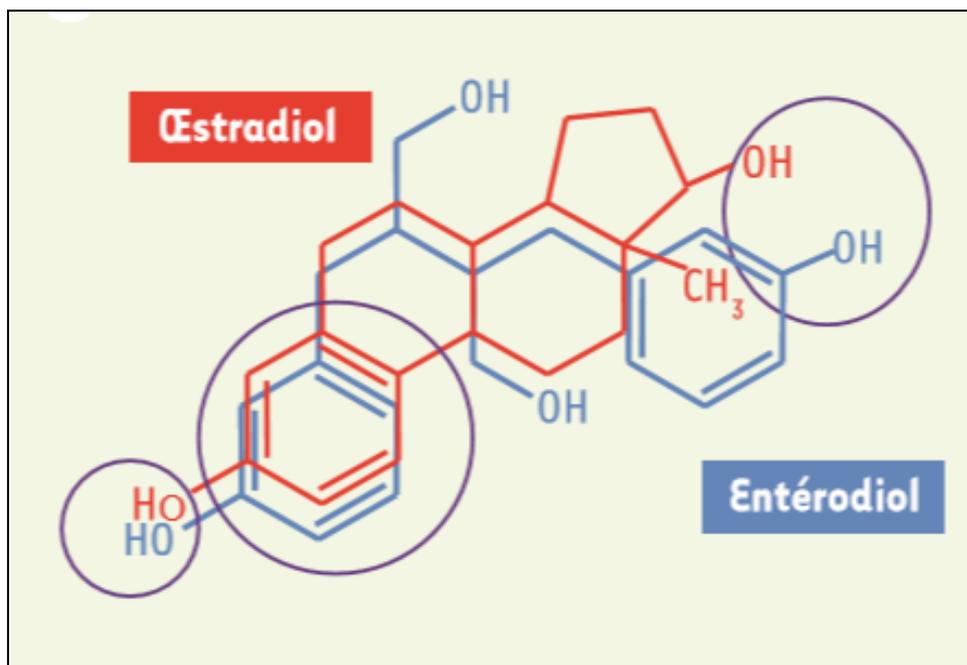


Figure 7 : Caractéristiques structurales communes entre l'œstradiol et l'entérodiol (Lainé et al., 2007)

Une alimentation riche en phyto-œstrogènes interagit fortement avec les œstrogènes naturellement présents dans l'organisme. Selon les concentrations d'œstrogènes naturels présents, les entérolignanes peuvent agir de deux manières différentes (Lamblin et al., 2008) :

- Agoniste des récepteurs aux œstrogènes (ER), en agissant comme un œstrogène naturel faible. C'est le cas chez la femme ménopausée et la jeune fille pré-pubère, par exemple, où les taux d'hormones sexuelles sont bas.
- Antagoniste des ER, en bloquant la fixation des ligands naturels.

3.1 Entérolignanes et ménopause

Les entérolignanes ont une structure similaire à l'œstradiol, et présentent une faible affinité pour les récepteurs aux œstrogènes (Kiyama, 2016). Ils peuvent ainsi avoir des propriétés œstrogéniques lorsque la dose d'œstrogène circulant est faible, chez les femmes ménopausées (Bedell et al., 2014).

Mais les essais cliniques randomisés versus placebo en double aveugle n'établissent pas que la consommation de graines de lin modifie les troubles climatériques liés à la ménopause (Pruthi et al., 2012). Les effets de la graine de lin sur la densité minérale osseuse chez les femmes post-ménopausées ne sont pas non plus concluants (Dew and Williamson, 2013).

Quelques études démontrent cependant une amélioration de la qualité de vie des femmes ménopausées après 3 mois de consommation de graines de lin (Cetisli et al., 2015).

De manière générale, aucune étude probante n'est actuellement disponible pour attester ou non du rôle des phyto-œstrogènes dans les symptômes post-ménopausiques (Franco et al., 2016). Malgré ce manque d'efficacité évidente, de nombreux compléments alimentaires à base de lin sont proposés en pharmacie à cet effet (Figure 8).



Figure 8 : Exemples de compléments alimentaires « Ymea » et « Féminabiane », retrouvés en Pharmacie pour soulager les symptômes de la ménopause.

3.2 Entérolignanes et cancers

3.2.1 Cancer du côlon

Des données épidémiologiques mettent en évidence que les femmes ménopausées et pré-ménopausées traitées par une hormonothérapie substitutive sont beaucoup moins susceptibles de développer un cancer du côlon (Niv, 2015), (Bouvier and Drouillard, 2014). Cela suggère une action des œstrogènes sur la physiopathologie cancéreuse du côlon et les phyto-œstrogènes de la graine de lin pourraient donc être potentiellement actifs (Foster, 2013). Plusieurs études expérimentales sur des rongeurs démontrent une efficacité des lignanes de la graine de lin sur le cancer du côlon, par augmentation de l'apoptose et diminution de la prolifération cellulaire (Gomides et al., 2015), (Curry, 2015). Mais en 2010, une grande étude de cohorte (57000 individus) a démontré un résultat anti-tumoral contradictoire des lignanes selon le sexe : avec des niveaux élevés d'entérolactone, un risque plus faible de cancer du côlon chez les femmes et un risque plus élevé de cancer rectal chez les hommes ont été observés (Johnsen et al., 2010).

3.2.2 Cancer du sein

Les études réalisées sur le cancer du sein ont conduit à des résultats très contradictoires. Une méta-analyse de 2010, qui compile 21 études, révèle qu'une exposition élevée aux lignanes de la graine de lin n'est pas significativement associée à une diminution du risque de cancer du sein (Buck et al., 2010). Il semblerait que de meilleurs résultats soient observés chez la femme ménopausée : une récente étude montre qu'une exposition élevée à l'entérolactone (EL) chez des femmes ménopausées atteintes d'un cancer du sein est associée à une réduction de la mortalité (Seibold et al., 2014). L'inverse n'est cependant pas démontré : la prévention du cancer du sein ne repose pas seulement sur le suivi d'un mode de vie sain.

En 2013, une vaste étude prospective sur 334850 femmes Européennes n'a montré aucune incidence significative des lignanes sur le cancer du sein, quel que soit le statut ménopausique des femmes (Zamora-Ros et al., 2013). Aucun essai clinique contrôlé en double aveugle n'est disponible pour confirmer ou infirmer le rôle éventuel des lignanes du lin dans la prévention du cancer du sein (Bruneton, 2009).

3.2.3 Cancer de la prostate

Il n'y a pas de résultats tranchés pour le cancer de la prostate (Bruneton, 2016). Il a été observé une corrélation entre la diminution de marqueurs tumoraux et une augmentation des concentrations en entérolignanes (EL et ED) dans les urines de patients atteints de cancer de la prostate (Azrad et al., 2013). Une méta-analyse plus récente sur les phyto-œstrogènes regroupant 11 études met en évidence une relation entre une diminution du risque de cancer de la prostate et une augmentation de la concentration sérique en entérolactone (He et al., 2015).

Les mucilages

- Principales fibres de la graine de lin**
- Utilisation traditionnelle dans le traitement de la constipation**

L'huile de lin

- L'une des plus grandes sources en acide α -linoléique (ALA), Oméga 3**
- Mauvaise conservation sous forme d'huile en raison de la forte concentration d'acides gras polyinsaturés**

Les lignanes

- Le sécoisolaricirésinol (SDG) est un phyto-œstrogène qui se comporte comme un SERM dans l'organisme**
- Il possède des propriétés potentiellement anti-cancéreuses, mais toujours au stade de la recherche scientifique**

L'acide α -linoléique (ALA) est à l'origine du regain d'intérêt pour la graine de lin, après la découverte de l'importance physiologique des Oméga 3 et du ratio Oméga 6/ Oméga 3. Nous allons dans un premier temps énoncer des généralités concernant les acides gras ainsi que leurs rôles physiologiques, puis nous verrons comment la graine de lin peut augmenter la qualité nutritionnelle de notre alimentation.

Chapitre 3 :

Généralités et physiologie des acides gras

1. Rappel sur les acides gras et leur métabolisme

1.1 Structure

Les acides gras sont les principaux constituants des lipides ; ils représentent plus de 80% de la masse molaire des lipides dans l'organisme. On distingue quatre catégories de lipides : les triglycérides, constitutifs du tissu adipeux, les phospholipides, et les sphingolipides constituant des membranes cellulaires, et les esters de cholestérol, présents en faible quantité. Les acides gras sont apportés par l'alimentation ou directement synthétisés par l'organisme.

Les acides gras se composent d'une chaîne hydrocarbonée linéaire, dont la longueur varie généralement entre 12 et 22 atomes de carbones (C), d'une extrémité méthyle et d'une extrémité carboxyle. Les acides gras se distinguent selon le nombre de doubles liaisons (insaturations) que renferme leur structure : on distingue les acides gras saturés (aucune double liaison), les acides gras mono-insaturés (une double liaison) et les acides gras polyinsaturés (au moins deux doubles liaisons).

Les doubles liaisons sont généralement de configuration *cis*, c'est-à-dire que les carbones situés de part et d'autre de la double liaison sont du même côté dans le plan, par rapport à la double liaison. Certains acides gras présentent cependant une configuration *trans* ; les carbones entourant la double liaison ne sont pas du même côté dans le plan. Ils sont produits industriellement par hydrogénation ou naturellement chez le ruminant.

Parmi les acides gras polyinsaturés, on distingue deux sous-familles, selon la position de la première double liaison par rapport à l'extrémité méthyle : la famille des Oméga 6, dont la première double liaison se trouve en position 6C, et la famille des Oméga 3, dont la première double liaison se trouve en position 3C (Figure 9) (Guesnet et al., 2005).

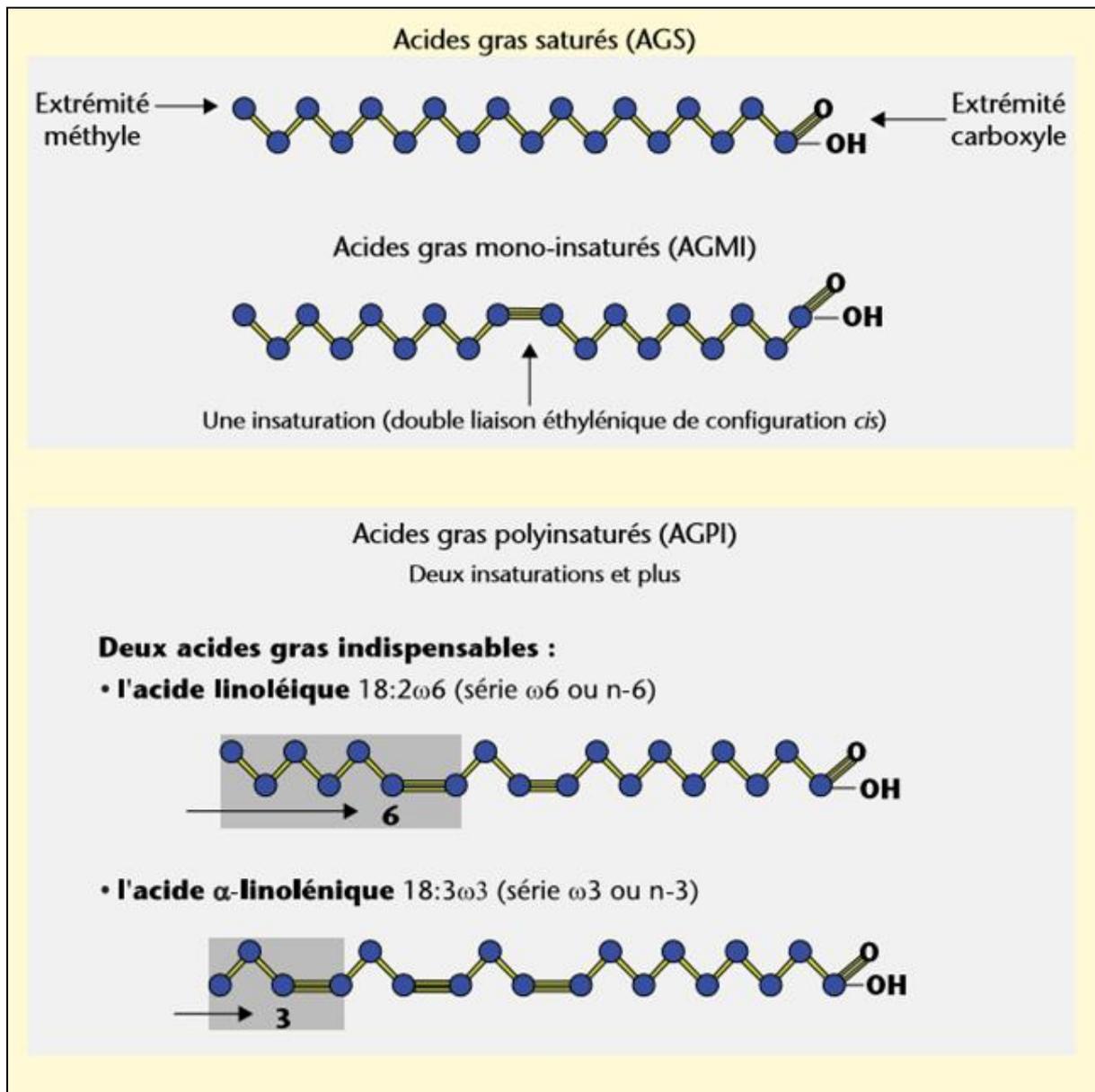


Figure 9 : Structure des différentes familles d'acides gras (Guesnet et al., 2005)

1.2 Nomenclature

Par convention, la nomenclature des acides gras utilise le nombre d'atomes de carbone, le nombre de doubles liaisons ainsi que la position de la première double liaison à partir de l'extrémité méthyle. La notation est la suivante :

C_n :x n-y

C : signifie atome de carbone

n : nombre d'atomes de carbone de l'acide gras

x : nombre de doubles liaisons

n-y : position de la première double liaison à partir de l'extrémité méthyle.

1.3 Les différentes familles d'acides gras

1.3.1. Les acides gras saturés

Leurs chaînes carbonées varient de 4 à 20 carbones (C) et ils n'ont aucune double liaison. L'acide palmitique (C16), l'acide laurique (C12), l'acide stéarique (C18) et l'acide myristique (C14), sont les plus abondants dans notre alimentation. On les retrouve dans la viande, la charcuterie ou encore le lait et ses produits dérivés. Apportés en excès, ce sont les acides gras les plus athérogènes.

1.3.2. Les acides gras mono-insaturés

Les acides gras mono-insaturés sont des acides gras à moyennes et longues chaînes, possédant une double liaison. Cette classe est principalement représentée par l'acide oléique (C18 :1 n-9), abondamment synthétisé par l'organisme grâce à la $\Delta 9$ -désaturase et présent en grande quantité dans notre alimentation. Il sert de substrat pour la production d'énergie, rentre dans la composition du tissu adipeux et des membranes cellulaires où il peut influencer l'activité des récepteurs, enzymes et transporteurs. Ce sont des acides gras peu sensibles à l'oxydation, puisqu'ils ne se composent que d'une seule double liaison. Un régime riche en acide gras mono-insaturé est un régime dit méditerranéen, basé sur une consommation importante d'huile d'olive. L'huile d'olive, riche en acide oléique, a un effet préventif sur les pathologies cardiovasculaires.

1.3.3. Les acides gras polyinsaturés

Les acides gras polyinsaturés (AGPI) se caractérisent par des chaînes carbonées longues (C 18 à C22) et plusieurs doubles liaisons (de 2 à 6).

Ils peuvent être apportés par l'alimentation ou synthétisés dans l'organisme. Deux acides gras, l'acide linoléique (LA) et l'acide α -linoléique (ALA) ne peuvent pas être synthétisés par l'homme. Contrairement aux cellules végétales, l'homme ne possède pas le matériel enzymatique nécessaire. Ces deux acides gras (LA et ALA) sont dits essentiels, et leur apport via l'alimentation est donc indispensable.

Ce sont les précurseurs métaboliques des deux familles d'acides gras polyinsaturés : l'acide α -linoléique est le précurseur de la famille des Oméga 3 et l'acide linoléique est le précurseur de la famille des Oméga 6.

2. Biodisponibilité des acides gras

2.1 Absorption des acides gras

La majorité des lipides alimentaires (97%) est apportée sous forme de triglycérides (TG) ou de triacylglycérols (TAG) (Raynal-Ljutovac et al., 2011). Une petite partie, de 1 à 10% est retrouvée sous forme de phospholipides (PL), provenant essentiellement de la viande, du poisson, du lait et des œufs. Il existe aussi des formes éthyl ester (EE), très minoritaires, bien que tout à fait absorbable par l'homme.

Les lipides, quel que soit leur forme, subissent différentes étapes lors de la digestion:

-Émulsification des graisses: les lipides sont tout d'abord émulsionnés, c'est-à-dire qu'ils sont dispersés dans une phase aqueuse sous forme de petites gouttelettes et stabilisés grâce aux sels biliaires, qui jouent le rôle de tensioactif.

-Hydrolyse des lipides: une fois émulsionnés, les lipides subissent l'action de différentes enzymes en fonction de leur structure moléculaire (lipase pour les triglycérides, phospholipase pour les phospholipides..). Cette action enzymatique permet d'obtenir des acides gras libres.

-Formation de micelles: les acides gras libres forment des micelles avec les sels biliaires, et deviennent des complexes hydrosolubles.

-Absorption par endocytose du contenu des micelles: les micelles se collent à la bordure des entérocytes pour permettre un passage par endocytose du contenu des micelles vers les entérocytes (Figure 10).

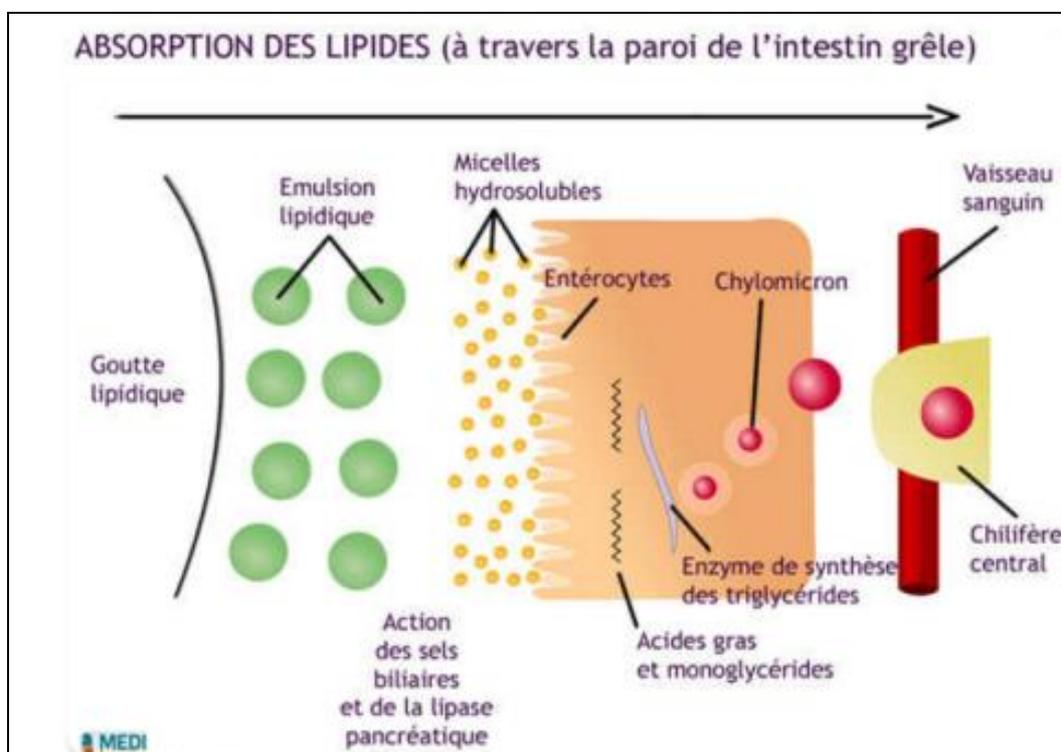


Figure 10 : Schéma de la digestion et de l'absorption des lipides chez l'homme

2.2 Paramètres de l'absorption

La biodisponibilité des acides gras varie en fonction de la structure moléculaire qui les porte. La forme libre des acides gras est évidemment la forme la mieux digérée et la mieux absorbée puisque le processus de digestion est largement simplifié. Les lipides sont cependant très peu retrouvés sous forme libre dans l'alimentation.

La biodisponibilité des acides gras semble meilleure lorsqu'ils sont apportés par les phospholipides, plutôt que par les triglycérides (Figure 11). Plusieurs études ont en effet montré qu'un apport d'acides gras sous forme de phospholipides engendrait une plus haute concentration d'acides gras Oméga 3 dans le plasma sanguin et une meilleure

incorporation dans les tissus cibles (foie, tissu adipeux, rétine..) (Ghasemifard et al., 2014).

Enfin la forme éthyl ester (EE) semble avoir une moins bonne biodisponibilité que celles des triglycérides, car leur hydrolyse est plus difficile et plus longue (Yang et al., 1990). De manière générale, la forme PL est la moins sensible à l'oxydation par rapport aux TG, et les TG sont moins sensibles à l'oxydation que la forme EE.

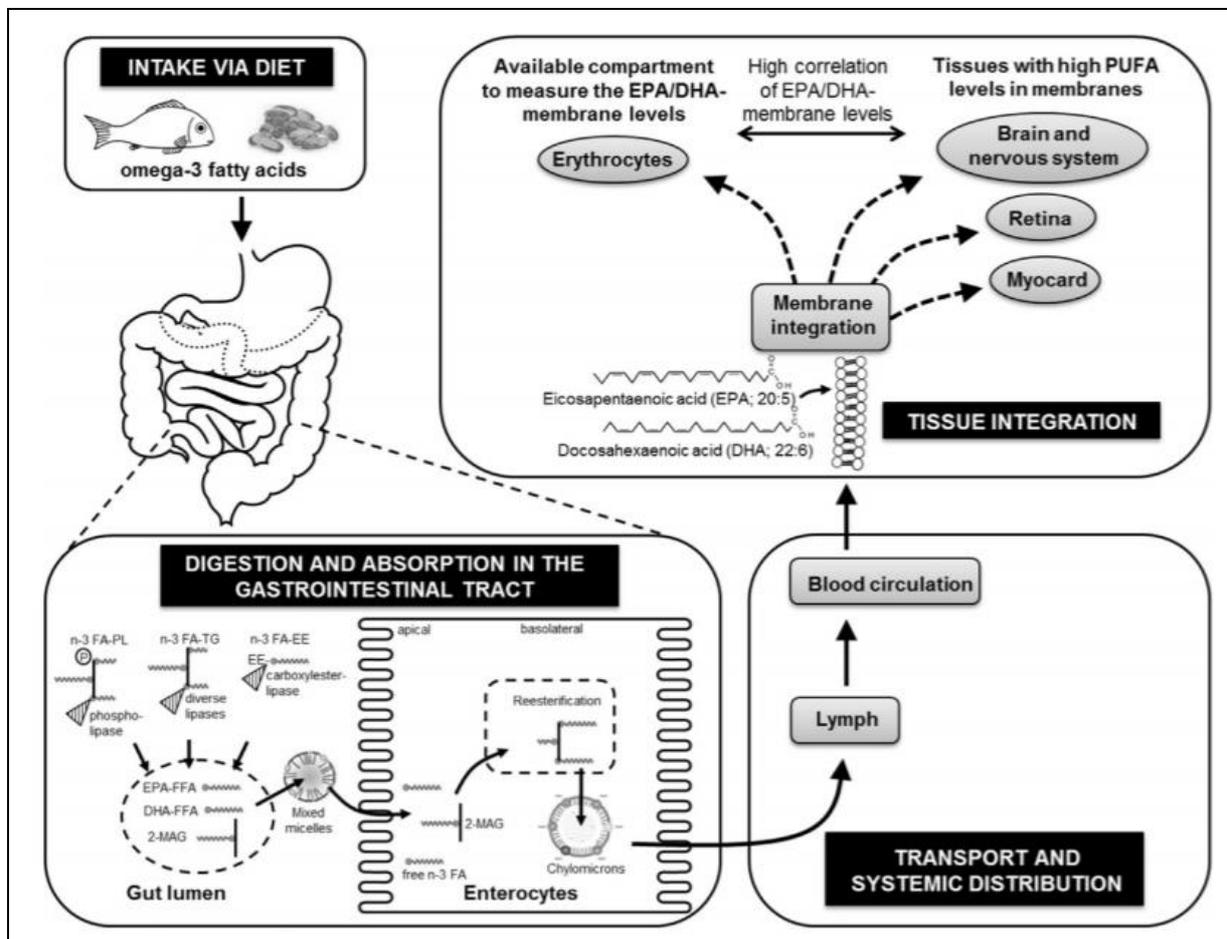


Figure 11 : Les acides gras Oméga 3 : de l'alimentation à l'incorporation tissulaire (Schuchardt and Hahn, 2013)

3. Principales fonctions exercées par les acides gras polyinsaturés

Les acides gras sont apportés par l'alimentation sous forme de triglycérides, forme chimique associant trois acides gras. Si on estime l'apport énergétique d'un homme à 2500 kcal/jour, dont le tiers doit être apporté par des lipides selon les recommandations officielles, la quantité d'acides gras apportés est d'environ 100 g/jour. Les acides gras sont absorbés au niveau de l'intestin grêle et passent dans la circulation sanguine pour être utilisés par les tissus tels que le muscle, le foie, ou le tissu adipeux. Dans un second temps, ils sont métabolisés par le foie puis redistribués dans l'ensemble de l'organisme, sous la forme de lipoprotéines (Guesnet et al., 2005).

La majorité des acides gras ont une fonction énergétique et une fonction structurale. Les AGPI peuvent aussi moduler des fonctions importantes dans l'organisme en agissant sur la transcription de gènes.

3.1 Rôle énergétique

Les acides gras polyinsaturés (AGPI) participent activement à la production d'énergie nécessaire au fonctionnement de l'organisme (respiration, digestion...). Plus de 50% des apports alimentaires en LA et ALA sont catabolisés par β -oxydation mitochondriale (Figure 12). 1g d'acide gras donne l'équivalent d'environ 9 kilocalories. Cette voie métabolique des AGPI est constante. Elle est plus importante chez l'homme que chez la femme. Cela vient du fait que les hommes ont de plus grands besoins énergétiques que les femmes, puisqu'ils ont une plus grande masse musculaire que les femmes.

Il semble aussi que l'ALA peut être substrat dans les réactions de cétogenèse. Bien que la source d'énergie du cerveau soit principalement le glucose, il peut aussi utiliser les corps cétoniques lors de périodes de jeûne ou de maladie. Il semble que l'ALA soit un substrat de choix dans les réactions de cétogenèse conduisant à la production de corps cétoniques assurant ainsi le maintien des fonctions cognitives (Nakamura et al., 2014).

3.2 Rôle structural

Les acides gras entrent dans la composition des membranes cellulaires. Ils sont constituants des phospholipides qui, en double couche, forment les membranes cellulaires (Figure 12). Ils modulent l'activité des récepteurs de canaux et de transporteurs impliqués dans la signalisation intra et extracellulaire. La nature des acides gras constitutifs des membranes module la fluidité de celle-ci. Plus elle contient des acides gras riches en doubles liaisons, plus elle est fluide. Les AGPI et plus particulièrement ceux de la famille des Oméga 3 fluidifient les membranes. À l'inverse, une forte concentration en acides gras saturés rigidifie la membrane. La fluidité permet un meilleur transfert des informations transmembranaires et contribue au bon fonctionnement cellulaire (Maulucci et al., 2016).

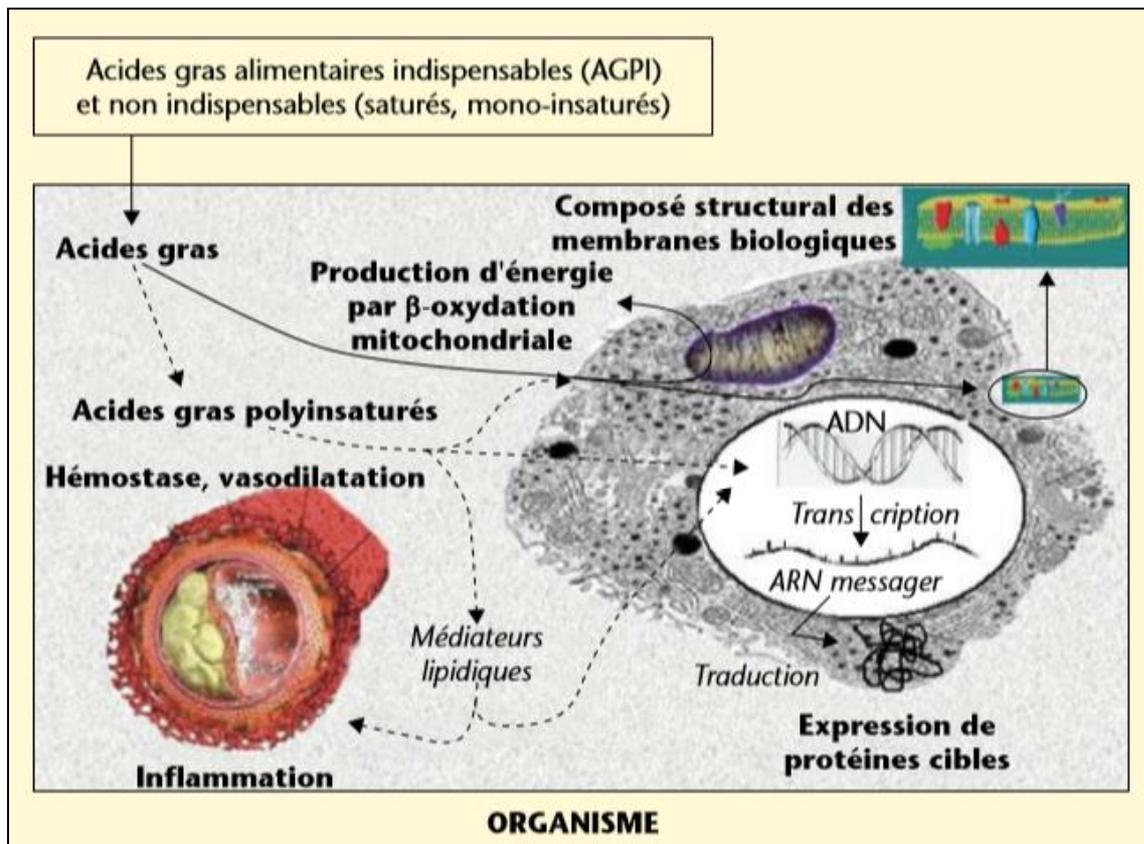


Figure 12 : Principales fonctions exercées par les acides gras (Guesnet et al., 2005)

3.3 Précurseurs de molécules bioactives

3.3.1 Synthèse de dérivés à longue chaîne

La métabolisation des acides gras essentiels, acide linoléique (LA) et acide α -linoléique (ALA) dans le réticulum endoplasmique, conduit à la synthèse de dérivés à longue chaîne carbonée, aux rôles physiologiques spécifiques (Figure 12). Cette bioconversion s'effectue grâce à l'action d'élongases, qui ajoutent des atomes de carbone à l'extrémité carboxyle, et de désaturases, qui augmentent le nombre de doubles liaisons (Figure 13).

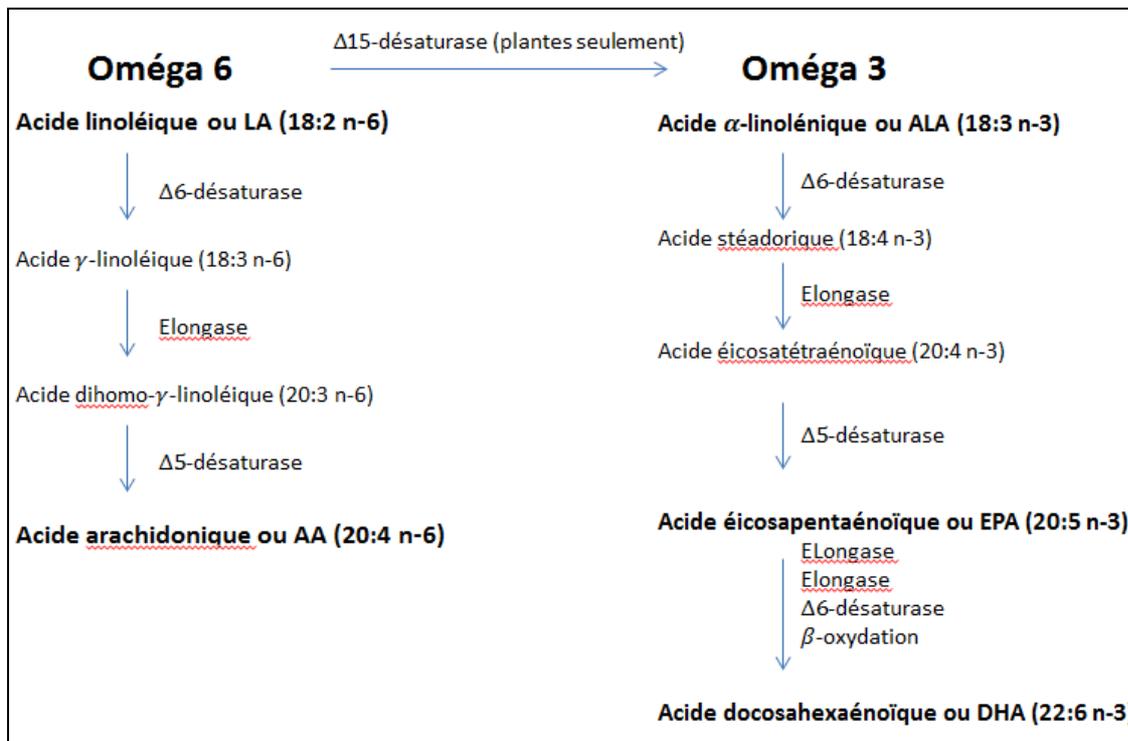


Figure 13 : Bioconversion de LA et ALA en acides gras à longues chaînes (Calder, 2013)

Sous l'action de ces enzymes, l'acide α-linolénique est converti en acide éicosapentaénoïque (20 :5 n-3 ou EPA) puis en acide docosahexaénoïque (22 :6 n-3 ou DHA). La synthèse du DHA nécessite une étape terminale de β-oxydation dans les peroxysomes, raccourcissant la chaîne carbonée (Calder, 2013).

Il semblerait que la conversion d'ALA en DHA soit limitée. Les études chez l'homme montrent que le taux de conversion en EPA et DHA est très bas. La formation de DHA à partir de cette voie métabolique est très faible.

Le DHA est produit par une dernière réaction d'oxydation. La quantité de métabolites produits lors de cette bioconversion est faible ; on estime entre 0,2% et 8% le taux de conversion d'ALA en EPA, et environ de 0,04% la conversion d'ALA en DHA. Il semblerait que le taux de conversion soit plus élevé chez la femme que chez l'homme ; cela permettrait de répondre aux besoins spécifiques des nouveau-nés en acide gras Oméga 3 pendant la grossesse et l'allaitement (Burdge, 2004).

Au niveau des Oméga 6, l'acide linoléique est converti en acide dihomo-γ-linolénique (20 :3 n-6 ou DGLA) puis en acide arachidonique (20 :4 n-6 ou AA).

3.3.2 Compétition enzymatique

Le métabolisme de la famille des Oméga 3 et des Oméga 6 requiert les mêmes enzymes. Il en résulte une compétition entre les deux familles, pour la formation de l'EPA et de l'AA, au niveau de la Δ6-désaturase, de l'élongase et de la Δ5-désaturase (Figure 13). Ces enzymes pencheront en faveur de la voie métabolique dont le précurseur est le plus disponible. Ainsi, un excès d'acides gras Oméga 6 favorisera la synthèse de l'acide arachidonique (AA) au détriment de l'EPA et du DHA. À l'inverse, un apport suffisant en acides gras Oméga 3 limitera la synthèse de l'AA et favorisera celle de l'EPA et du DHA.

Pour un apport équivalent, le substrat préféré de la $\Delta 6$ -désaturase est l'acide α -linoléique (Innis, 2014).

3.3.3 Synthèse de médiateurs lipidiques

L'EPA, le DHA et l'AA sont constitutifs des membranes phospholipidiques au même titre que l'acide linoléique et l'acide α -linoléique. Mais ils sont aussi précurseurs de molécules oxygénées aux multiples rôles dans l'organisme (Figure 14) ; on parle de médiateurs lipidiques (Calder, 2013). On différencie les médiateurs lipidiques synthétisés par l'AA et l'EPA à ceux synthétisés par le DHA.

-Les médiateurs lipidiques synthétisés à partir de l'acide éicosapentaénoïque (EPA) et de l'acide arachidonique (AA)

L'EPA (Oméga 3) et l'AA (Oméga 6) sont les principaux précurseurs des éicosanoïdes (prostanoides, leucotriènes et acides gras polyinsaturés hydroxylés). Ces acides gras sont libérés des membranes phospholipidiques par l'action d'une phospholipase (A2) et se retrouvent dans le cytoplasme (Figure 15). Ils peuvent ensuite suivre deux voies métaboliques (Figure 15) :

- la voie des cyclo-oxygénases (COX)
- la voie des lipoxygénases (LOX)

La voie des COX génère les prostanoides : les prostaglandines (PG), les prostacyclines (PGI), les thromboxanes (TX). La voie des LOX génère les leucotriènes (LT) et les AGPI hydroxylés. La famille des acides gras Oméga 6 génère la série 2 des prostanoides et la série 4 des leucotriènes, aux propriétés fortement inflammatoires tandis que la famille des acides gras Oméga 3 génère la série 3 des prostanoides et la série 5 des leucotriènes, aux propriétés inflammatoires faibles.

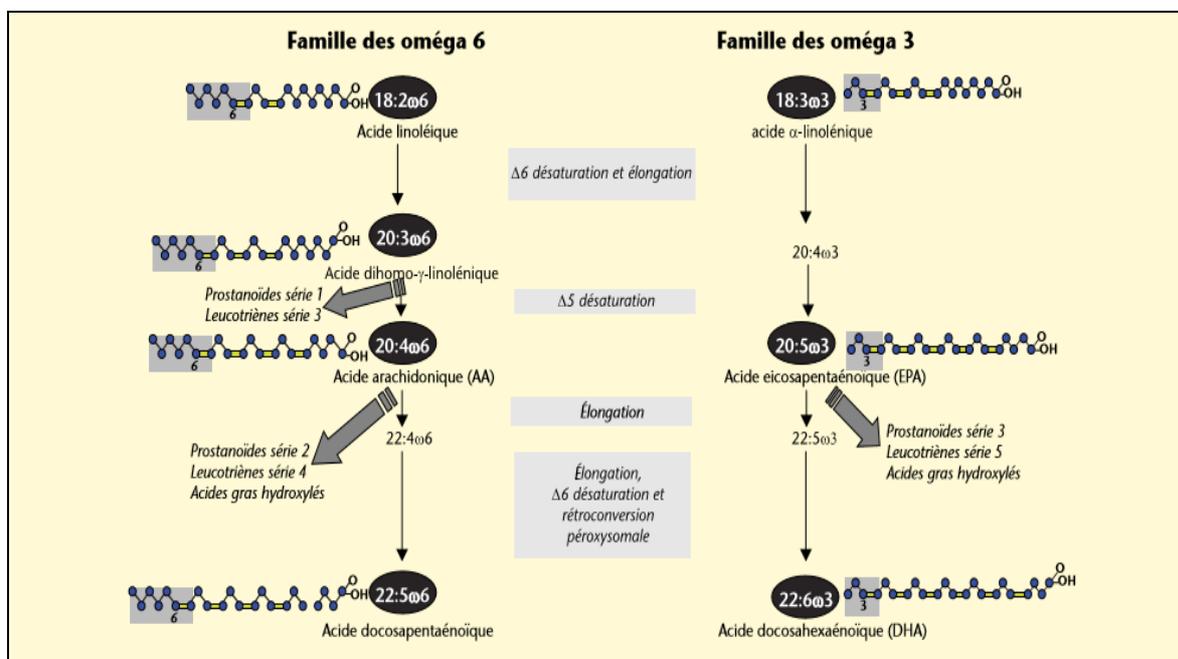


Figure 14 : Voies de biosynthèse des acides gras de la famille des Oméga 3 et des Oméga 6 et des éicosanoïdes (Guesnet et al., 2005)

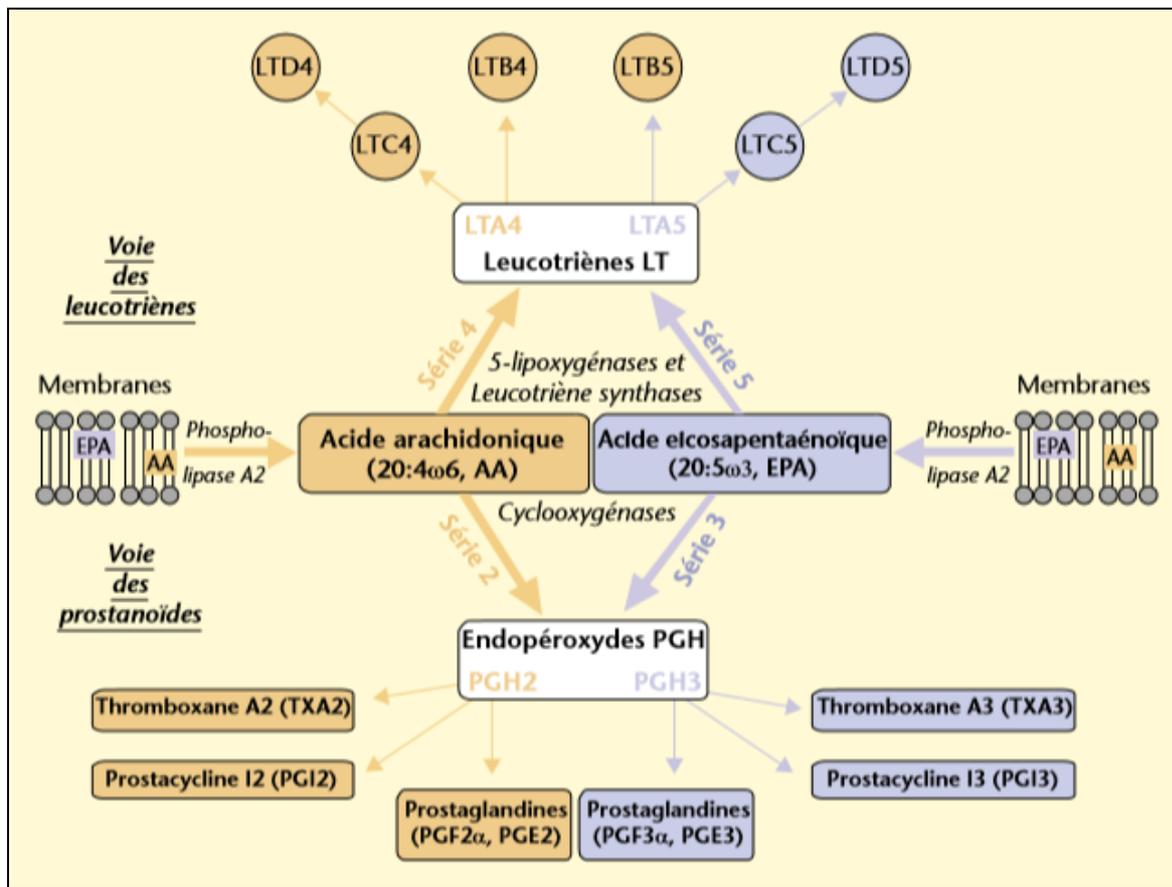


Figure 15: Voies métaboliques de la cyclo-oxygénase et de la lipoxygénase (Guesnet et al., 2005)

Les enzymes COX et LOX sont retrouvées dans quasiment toutes les cellules. Un équipement enzymatique spécifique est cependant nécessaire pour chaque type de molécules. Ainsi, à partir de l'acide arachidonique (AA), le thromboxane A2 est synthétisé dans les plaquettes tandis que la prostaglandine E2 et la prostacycline I2 sont synthétisées dans les cellules de l'endothélium vasculaire. Les leucotriènes sont principalement synthétisés dans les cellules du système immunitaire, comme les monocytes, ou les mastocytes (Marion-Letellier et al., 2015).

-Les médiateurs lipidiques synthétisés à partir de l'acide docosahexaénoïque (DHA)

Le DHA est le précurseur de molécules apparentées aux éicosanoïdes ; les résolvines et les neuroprotectines. Synthétisées dans la phase tardive de l'inflammation, on leur attribue des propriétés anti-inflammatoires et protectrices vis-à-vis du stress oxydatif. Le DHA est l'acide gras majoritaire du cortex cérébral et de la rétine.

3.3.4 Rôles des médiateurs lipidiques

Dans l'ensemble des tissus, les médiateurs lipidiques jouent un rôle similaire à celui des hormones : ils sont capables de réguler de nombreuses fonctions telles que la contraction des muscles lisses, la reproduction, l'activité neuronale, l'inflammation ou encore la coagulation.

-Les médiateurs lipidiques issus de l'AA, et donc de la famille des Oméga 6 sont des molécules pro-inflammatoires. Le thromboxane A2 produit au niveau des plaquettes est

un puissant agrégant plaquettaire. La prostacycline I2 produite dans les cellules endothéliales a un fort pouvoir vasodilatateur. La prostaglandine E2 exerce de nombreux effets pro-inflammatoires.

-Les médiateurs lipidiques issus de l'EPA sont aussi des molécules pro-inflammatoires, mais beaucoup moins puissantes que celles issues de l'AA. L'effet inflammatoire est donc moins important, et favorise le retour à l'homéostasie.

-Les médiateurs lipidiques issus du DHA ont des propriétés anti-inflammatoires. Les résolvines et les neuroprotectines inhibent l'apoptose cellulaire induit par le stress oxydant et limitent l'infiltration des leucocytes.

3.4 Modulateurs de la transcription génique

Les AGPI et leurs dérivés modulent le processus de signalisation intracellulaire. Ils agissent par l'intermédiaire de facteurs de transcription et de voies de signalisation sur l'expression des gènes cibles (Figure 16). Parmi ces facteurs de transcription, il y a :

-Les récepteurs nucléaires PPAR (peroxysome proliferator-activated receptors), principalement retrouvés dans le foie, les tissus adipeux et les muscles. Ces récepteurs jouent un rôle majeur dans le développement du tissu adipeux en favorisant la différenciation et le développement des adipocytes . Ils stimulent aussi la β -oxydation mitochondriale.

-Les protéines de signalisation SREBP-1c (sterol regulatory element binding protein-1c), principalement retrouvées dans le réticulum endoplasmique du foie, des tissus adipeux et du muscle. Elle contrôle la voie de la lipogénèse de novo, la bioconversion des AGPI et la synthèse des triglycérides. Elle est également impliquée dans la régulation de l'homéostasie glucidique. Les AGPI exercent une action indirecte en inhibant la transcription de la protéine SREBP-1c

-Les facteurs nucléaires hépatiques HNF4 (hepatic nuclear factor 4).

-Les récepteurs aux rétinoïdes RXR (retinoid X receptor), couplés aux récepteurs nucléaires PPAR.

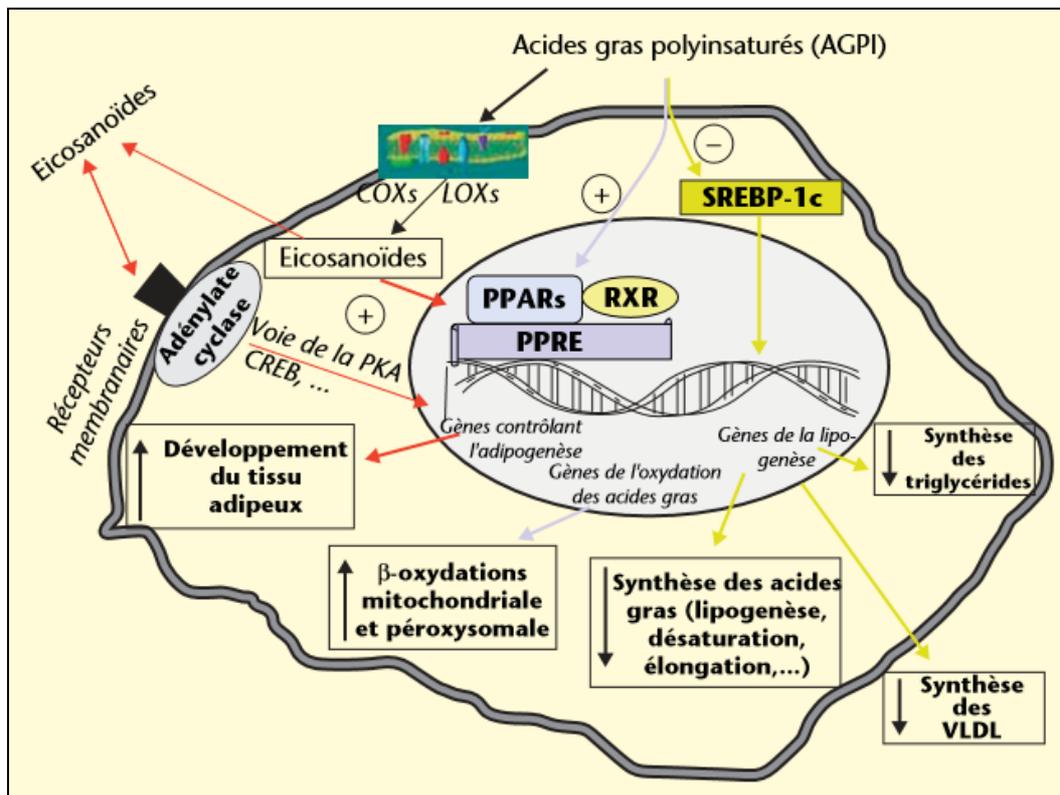


Figure 16 : Représentation schématique des effets des AGPI sur la transcription de gènes au niveau des hépatocytes et des adipocytes (Guesnet et al., 2005)

-La biodisponibilité des acides gras varie en fonction de la structure moléculaire qui les porte. Les formes phospholipides et triglycérides sont mieux absorbées que les formes éthyl ester.

-L'acide α -linoléique présent dans la graine de lin est un acide gras indispensable qui appartient à la famille des acides gras polyinsaturés (AGPI).

-Les AGPI se divisent en deux grandes familles : les Oméga 3, dont le précurseur est l'acide α -linoléique (ALA) et les Oméga 6 dont le précurseur est l'acide linoléique (LA).

-Les AGPI ont un rôle énergétique et structural dans la cellule. Ils sont aussi à l'origine de molécules bioactives.

-L'ALA et LA entre en compétition enzymatique lors de la métabolisation en métabolites secondaires.

-L'ALA, le LA et leurs métabolites secondaires modulent de nombreuses fonctions cellulaires.

4. Sources des acides gras essentiels LA et ALA

On a mesuré précédemment toute l'importance de l'acide linoléique et de l'acide α -linoléique dans l'alimentation de l'homme. Nous nous intéressons maintenant aux aliments, sources d'ALA et de LA. Les données concernant les sources en acides gras sont tirées de la table Ciqual, base de données référente sur la composition nutritionnelle des aliments en France. Elle est gérée par l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail (Anses).

4.1 Source en acide α -linoléique (ALA)

Les aliments riches en ALA sont peu nombreux : il s'agit principalement des huiles de lin et de colza, et des graines de lin et de chia. D'après la table Ciqual mise à jour en décembre 2016, les classes d'aliments les plus riches en acide α -linoléique sont les huiles, les graines oléagineuses, les sauces et les matières grasses (Tableau 3).

Tableau 3 : Aliments les plus riches en acide α -linoléique (Table Ciqual, 2016)

Groupe d'aliments	Aliments	Teneur en ALA en g/100g
Huiles végétales	Huile de lin	53,3
	Huile de noix	11,9
	Huile de colza	7,6
	Huile de soja	6,89
	Huile combinée (mélange huile d'olive et graines)	2,18
	Huile de foie de morue	1,76
Condiments et sauces	Tarama	4,36
	Sauce béarnaise	2,98
	Mayonnaise	2,71
Matières grasses	Matière grasse à 55% de MG, allégée, riche en oméga 3/6	2,9
	Matière grasse à 35% de MG, enrichie en stérols	2,06
Graines oléagineuses et noix	Chia, graine séchée	17,8
	Lin, graine	16,7
	Noix, séchées, cerneaux	7,45
Gâteaux	Madeleine	< à 2,07
	Gâteau au chocolat mi-cuit	1,91

4.2 Source en acide linoléique (LA)

D'après la table Ciqual, les aliments les plus riches en acide linoléique sont les huiles, les sauces, les margarines et les graines oléagineuses (Tableau 4).

Tableau 4 : Aliments les plus riches en acide linoléique (Table Ciqual, 2016)

Groupe d'aliments	Aliments	Teneur en LA en g/100g
Huiles végétales	Huile de pépins de raisin	64
	Huile de noix	56,1
	Huile de tournesol	54,4
	Huile de maïs	54,1
	Huile de soja	52
	Huile de sésame	39,6
	Huile d'arachide	24,6
	Huile de colza	19,3
Condiments et sauces	Mayonnaise à l'huile de tournesol	46,4
	Sauce vinaigrette (50-75% d'huile)	15,4
	Sauce pesto	13,9
Margarine et matière grasse	Margarine à 80% MG au tournesol	31,1
	Matière grasse allégée, à 55% MG	23,5
Graines oléagineuses et noix	Noix, séchées, cerneaux	38,3
	Graine de tournesol	33,8
	Noix du Brésil	22,9
	Graine de sésame	20,9
	Noix de pécan	20,7
	Cacahuètes grillées, salées	17

5. Consommation alimentaire actuelle en acides gras essentiels

5.1 Outils utilisés

5.1.1. Les ANC

Les apports nutritionnels recommandés (ANC) représentent les apports moyens nécessaires en énergie, nutriments (protéine, glucide, lipide), vitamines et minéraux pour couvrir les besoins physiologiques de l'homme. Ils varient en fonction du sexe, de l'âge et de l'état physiologique des individus.

En 2010, les apports nutritionnels conseillés concernant les acides gras ont évolué. Ils sont définis dans le tableau 5. Compte tenu du lien avéré entre l'apport nutritionnel et la santé, ces nouveaux ANC prennent en compte non seulement les besoins physiologiques nécessaires au bon fonctionnement de l'organisme, mais aussi les besoins requis pour prévenir des pathologies comme le cancer ou l'obésité (Anses, 2010).

Tableau 5 : Apport nutritionnel conseillé (ANC) en acide gras définis en 2010

ANC 2010 en mg ou % de l'AESA (sauf si autre précision)	Enfants (3 à 9 ans)	Adolescents et adultes (10ans et plus)
Lipides totaux	35-40 %	35-40 %
Acides laurique+myristique+palmitique	≤8 %	≤8 %
Acide oléique	15-20 %	15-20 %
LA	4 %	4 %
ALA	1%	1%
Ratio LA/ALA	< 5	< 5
DHA	125 mg	250 mg
EPA+DHA	250 mg	500 mg

5.1.2. L'étude INCA₂

Pour connaître l'état nutritionnel de la population française et l'évolution de sa consommation alimentaire, l'Anses réalise des études Individuelles Nationales des Consommations Alimentaires (INCA) tous les 7ans. L'étude INCA₂, réalisée entre 2006 et 2007 a étudié la consommation alimentaire de plus de 4000 individus choisis au hasard, âgés 3 à 79 ans (INCA 2, 2006). Une nouvelle étude INCA₃ a été réalisée sur plus de 8000 individus en 2014. Les individus échantillonnés ont aussi été choisis au hasard et sont âgés de 0 à 79 ans. Contrairement à INCA₂, elle a pris en compte les apports en acide gras liés aux compléments alimentaires. Étant donné le développement fulgurant de ces compléments, il serait intéressant de comparer les apports entre INCA₂ et INCA₃, mais les résultats de l'étude INCA₃ ne devraient être publics qu'en juin 2017.

Les résultats concernant les apports lipidiques ont été analysés par l'Anses en septembre 2015, soit très récemment. Les tableaux présentés par la suite sont issus de cette analyse.

5.2 Consommation lipidique en France

Selon les recommandations, l'apport en lipides dans notre alimentation doit correspondre à 35-40% des apports totaux en énergie d'un individu. Les études INCA montrent que l'apport lipidique moyen chez les enfants est de 37,3% de l'AESA (Apport Energétique Sans Alcool) et chez les adultes de 37,96% de l'AESA. L'apport moyen en lipides est donc dans la fourchette des recommandations. Cependant, l'analyse de l'étude INCA₂ montre une forte disparité entre les différentes classes d'acides gras. Les acides gras saturés sont consommés en excès tandis que les acides gras mono-insaturés et

polyinsaturés sont insuffisants dans notre alimentation. Ces tendances sont comparables à celles observées dans les pays Européens ou les pays d'Amérique du Nord (Tressou et al., 2016).

La quantité d'apport en lipides respecte donc les ANC, mais leur qualité ne répond pas aux recommandations. La consommation des acides gras mono-insaturés et polyinsaturés est à favoriser. Les acides gras mono-insaturés sont très majoritairement représentés par l'acide oléique, que l'on retrouve dans l'huile d'olive. Parmi les acides gras polyinsaturés, l'acide EPA et l'acide DHA sont apportés par les animaux marins. La consommation de deux portions de poisson par semaine est préconisée.

Les acides gras précurseurs des familles des Oméga 6 et Oméga 3, l'acide linoléique et l'acide α -linoléique doivent répondre à deux recommandations : un apport suffisant pour respecter les besoins physiologiques d'une part, et d'autre part, un ratio LA/ALA strictement inférieur à 5 (Anses, 2010).

5.3 Consommation alimentaire en aliments riches en acide α -linoléique (ALA)

5.3.1. Apports quotidiens réels et comparaison avec les ANC

L'estimation des apports moyens en acides gras est obtenue grâce à l'étude INCA₂ et à la table Ciqual. Les données référencées sont toutes de source française (Anses, 2015).

Les apports moyens en ALA chez les enfants sont en moyenne de 0,8g par jour, soit environ 0,4% de leurs apports énergétiques (Tableau 6). Chez les adultes, l'apport moyen en ALA est de 0,9g par jour, ce qui représente 0,4% de leurs apports énergétiques sans alcool (AESA). Les femmes consomment plus d'aliments riches en ALA que les hommes. En 2010, les ANC en acide α -linoléique (ALA) ont été fixés à 1% de l'AESA pour tous les individus de plus de 3 ans. Seulement 0,24% des enfants et 0,96% des adultes atteignent les seuils d'apports en ALA fixés par les ANC, ce qui signifie que plus de 99% de la population française a un apport alimentaire insuffisant en ALA (Tableau 6).

Tableau 6 : Apports quotidiens en acide α -linoléique (ALA) et proportion des sujets ayant un apport satisfaisant en ALA (Anses, 2015)

		Apport ALA en g/jr	Apport ALA en % des AESA	Apport satisfaisant (\geq l'ANC)
Enfants 3 à 17 ans	Garçons	0,82	0,38	0,35
	Filles	0,73	0,39	0,13
Adultes 18 à 79 ans	Garçons	1,01	0,41	0,79
	Filles	0,86	0,45	1,09

5.3.2. Aliments contributeurs

Les aliments les plus contributifs en ALA chez l'enfant sont les pâtisseries et les gâteaux (16,90%), les viandes et charcuteries (10,22%) et les huiles (9,69%). Chez l'adulte, les grandes familles d'aliments contributives sont les viandes-charcuteries (11,49%) et les

huiles (11,47%). Les sauces et condiments sont également contributeurs à hauteur de 9,83% (Tableau 7).

Tableau 7 : Aliments contributeurs aux apports en acide α -linoléique (ALA) chez les Français

Groupes d'aliments contributeurs à l'apport en ALA	Enfants de 3 ans à 17 ans		Adultes de 18 ans à 79 ans	
	Aliments contributeurs en g/jr	Aliments contributeurs en % des apports totaux en ALA	Aliments contributeurs en g/jr	Aliments contributeurs en % des apports totaux en ALA
Pâtisseries, gâteaux	0,131	16,90	0,103	11,09
Viandes et charcuterie	0,079	10,22	0,107	11,49
Huiles	0,075	9,69	0,107	11,47
Huile de colza	0,027	3,49	0,037	3,95
Huile d'olive	0,021	2,65	0,030	3,22
Huile mélangée équilibrée	0,018	2,37	0,024	2,61
Condiments et sauces	0,063	8,07	0,092	9,83
Lait, Œuf et dérivés	0,064	8,34	0,075	8,05
Fruits et légumes frais	0,050	6,37	0,082	8,75
Plats composés	0,042	5,44	0,048	5,14
Margarine	0,042	5,42	0,072	7,72

La consommation d'ALA est associée à des aliments contenant une forte quantité de lipides. Les pâtisseries/gâteaux et les viandes/charcuteries appartiennent aux catégories d'aliments les plus contributrices aux apports lipidiques, riches en acides gras saturés comme l'acide myristique, l'acide laurique ou l'acide palmitique. Ces acides gras sont potentiellement athérogènes s'ils sont consommés en excès. Or la proportion d'adultes et d'enfants confondus à risque d'excès d'apports en acide laurique, acide palmitique et acide myristique est de 81%. Encourager la consommation de ces aliments n'est donc pas une solution raisonnable pour augmenter les apports en ALA dans l'alimentation.

5.4 Consommation alimentaire en aliments riches en acide linoléique (LA)

5.4.1. Apports quotidiens réels et comparaison avec les ANC

Les enfants ont un apport en LA d'environ 7g/jour, tandis que les adultes ont une consommation d'environ 9g/jour, ce qui représente respectivement 3,6% et 3,96% des AESA (Tableau 8). L'ANC pour cet acide gras étant fixé à 4% des AESA, la population française semble avoir des apports suffisants en acide linoléique. Mais les apports sont inégaux chez les individus. Un rapport de 2015 sur les acides gras montre que seulement 25,1% des enfants et 36,7% des adultes ont un apport égal ou supérieur aux ANC pour l'acide linoléique. Les femmes ont des apports supérieurs aux hommes. On peut donc conclure que certains individus consomment trop d'acide linoléique tandis que la majorité des Français n'en consomment pas suffisamment.

Tableau 8 : Apport quotidien en acide linoléique (LA) des adultes et des enfants d'après INCA 2

		Apport LA en g/jr	Apport LA en % des AESA	Apport satisfaisant (≥ l'ANC)
Enfants 3 à 17 ans	Garçons	7,63	3,54	25,9
	Filles	6,82	3,67	28,37
Adultes 18 à 79 ans	Garçons	9,30	3,80	31,68
	Filles	7,98	4,11	41,75

5.4.2. Aliments contributeurs

Les aliments les plus contributifs aux apports en LA sont les mêmes chez l'adulte et chez l'enfant. Ce sont les huiles (25,50% pour les adultes), les viandes-charcuterie (13,29% pour les adultes) et les sauces (12,87% pour les adultes). Chez les enfants, les pâtisseries, gâteaux et viennoiseries arrivent en 4^{ème} position des familles les plus contributrices aux apports en LA, avec 9,44% (Tableau 9).

Tableau 9 : Aliments contributeurs aux apports en acide linoléique (LA) chez les Français

Groupes d'aliments contributeurs à l'apport en LA		Enfants de 3 ans à 17 ans		Adultes de 18 ans à 79 ans	
		Aliments contributeurs en g/jr	Aliments contributeurs en % des apports totaux en LA	Aliments contributeurs en g/jr	Aliments contributeurs en % des apports totaux en LA
Huiles		1,747	24,14	2,198	25,50
Dont les majoritaires	Huile de tournesol	1.025	14,17	1,149	13,32
	Huile d'olive	0.212	2,94	0,311	3,61
	Mélange d'huiles	0.279	3,85	0,370	4,29
Viandes et charcuterie		0,843	11,66	1,144	13,29
Condiments et sauces		0,771	10,66	1.109	12,87
Pâtisseries, gâteaux et viennoiseries		0,683	9,44	0,510	5,92
Chocolat, biscuits sucrés et salés, barres		0,511	7,07	0,220	2,55
Plats composés		0,470	6,49	0,507	5,89
Margarine		0,334	4,62	0,524	6,07

La consommation en acide linoléique est intimement liée à la consommation d'aliments riches en lipides.

5.5 Rapport LA/ALA

Les apports en LA et en ALA sont insuffisants pour une majorité de la population française. Toutefois, le déficit des apports entre les deux acides gras n'est pas du même ordre de grandeur : les ANC en ALA ne sont pas couverts chez presque 100% de la population tandis que les ANC en LA ne sont pas atteints chez « seulement » 66,5% de la population. En conséquence, le ratio LA/ALA se trouve déséquilibré, de l'ordre de 10 chez les enfants et les adultes (Tableau 10) alors que les nouveaux ANC de 2010 recommandent de maintenir un ratio LA/ALA strictement inférieur à 5. La quasi-totalité des individus français (98%) a donc un ratio LA/ALA deux fois supérieur aux recommandations. Tout en restant élevé, ce ratio diminue légèrement avec l'âge.

Tableau 10 : Ratio moyen en LA/ALA des individus français et proportion des sujets ayant un ratio supérieur ou égal aux recommandations

	Enfants		Adultes	
	Garçons	Filles	Garçons	Filles
Ratio moyen	9,93	9,74	9,63	9,84
Proportion en % des individus ayant un ratio ≥ 5	97,96	99,12	97,99	96,49

Dans ce document nous n'avons pas détaillé les apports en acide arachidonique (AA), en acide éicosapentaénoïque (EPA) et docosahexaénoïque (DHA). Or le rapport Oméga 6/ Oméga 3 inclue les acides gras LA et AA pour les Oméga 6 et les acides gras ALA, EPA et DHA pour les Oméga 3. Cependant, les apports en EPA et DHA sont très faible, et les aliments riches en AA sont globalement les mêmes que ceux riches en LA. Le rapport Oméga 6/ Oméga 3 sera donc encore plus élevé que le rapport LA/ALA :

-rapport LA/ALA : proche de 10/1

-rapport Oméga 6/ Oméga 3 : proche de 25/1

-Les animaux fournissent la principale source de lipides alimentaires en Occident et ces derniers sont majoritairement constitués d'acides gras saturés.

-Les apports moyens en acides gras polyinsaturés sont inférieurs aux ANC.

-Les apports en acides gras de la famille des Oméga 6 sont suffisants voire aujourd'hui excédentaires dans la ration alimentaire.

- Les apports en acides gras de la famille des Oméga 3 sont très insuffisants.

-Le rapport entre Oméga 6 et Oméga 3 est passé en 40 ans de 5 à 25 dans l'alimentation humaine. Ce déséquilibre entraine de nombreuses répercussions physiologiques.

6. Conséquences d'un rapport Oméga 6/ Oméga3 déséquilibré

6.1. Impacts physiologiques

6.1.1. Inflammation de bas grade

L'inflammation est une composante innée des mécanismes de défense de l'organisme. C'est une réponse à une agression extérieure, qui se caractérise par une augmentation du débit sanguin, une dilation capillaire et une production intensive de médiateurs chimiques. Elle permet la destruction des agents toxiques et la réparation des tissus endommagés. L'inflammation est un système de défense qui doit se résoudre rapidement, via les systèmes de résolution de l'inflammation (résolvines) pour un retour à l'homéostasie (Calder et al., 2013). Lorsque le phénomène inflammatoire se prolonge trop longtemps, il devient pathologique.

L'incorporation en excès dans les membranes lipidiques des dérivés des acides gras Oméga 6 (LA, AA) induit une réponse inflammatoire légère sans résolution complète. Les molécules de l'inflammation (cytokines, chimiokines, leucocytes) sont alors produites de manière continue et migrent dans la circulation sanguine vers le cœur, le cerveau, les os etc... sans qu'une symptomatologie claire traduise ce phénomène: on parle d'inflammation de bas grade. Les cytokines pro-inflammatoires induites par l'inflammation de bas grade vont activer les cellules de l'immunité innée périphérique (monocytes et macrophages) et les cellules de l'immunité innée cérébrale (cellules microgliales) (Calder et al., 2009)

L'inflammation de bas grade est associée à de nombreuses pathologies chroniques comprenant entre autres les maladies cardiovasculaires, les maladies métaboliques telles que l'obésité ou le diabète, les maladies neuropsychiatriques (dépression, Alzheimer) ou encore le cancer (Simopoulos, 2016).

6.1.2. Hyperplasie adipocytaire

La quantité excessive d'acides gras Oméga 6 apportés dans l'alimentation module les mécanismes de l'adipogénèse. Ils favorisent en effet la différenciation terminale des pré-adipocytes en adipocytes matures, qui s'accumulent dans le tissu graisseux et dans le foie. La β -oxydation des acides gras diminue tandis que la synthèse des enzymes nécessaires à la production d'acide gras de novo est augmentée (Figure 16).

L'hypertrophie du tissu adipeux est associée à une infiltration de molécules immunitaires, en particulier de macrophages (Figure 17), à l'origine de la synthèse de cytokines inflammatoires (TNF- α , IL-6, IL-1 β). Les adipocytes eux-mêmes produisent et libèrent des molécules inflammatoires, qui favorisent l'inflammation de bas grade (Calder et al., 2011).

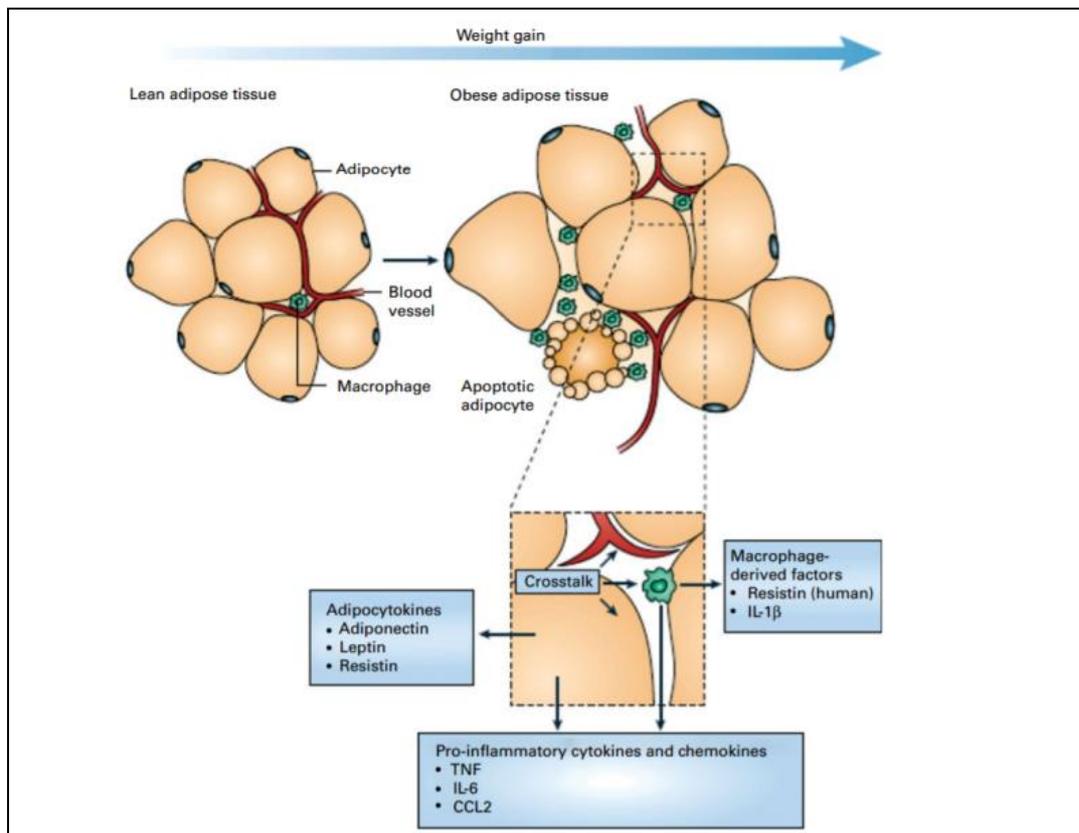


Figure 17 : Représentation schématique des interactions entre les macrophages et les adipocytes lors d'une augmentation de la masse du tissu adipeux (Calder et al., 2011)

6.1.3. Hyperlipidémie

Le ratio Oméga 6/ Oméga 3 déséquilibré dans l'alimentation induit une augmentation de la synthèse des triglycérides et des VLDL dans le foie et le tissu adipeux (Figure 16). Les VLDL se transformeront en LDL dans la circulation sanguine pour transporter le cholestérol. Le taux de cholestérol et de triglycérides augmentent donc dans le sang, ce qui contribue à durcir et à épaissir les parois des artères. Lorsque la teneur en LDL dans le sang est élevée, le cholestérol peut se fixer sur les parois endothéliales des vaisseaux et entraîner de graves lésions, en particulier au niveau des coronaires (Li et al., 2017).

6.1.4. Insulino-résistance

Les cytokines pro-inflammatoires (TNF- α , IL-6, IL-1 β) produites par l'inflammation de bas grade et par l'hypertrophie du tissu adipeux altèrent la cascade de signalisation de l'insuline (Ceppo et al., 2014) et diminuent la sensibilité des récepteurs à l'insuline du foie et des muscles. La captation et le transport du glucose vers les muscles sont donc altérés tandis que le foie augmente la production de glucose. Ce phénomène induit une résistance à l'insuline (Xu et al., 2003) (Calder et al., 2011).

6.2. Pathologies associées

6.2.1. Surpoids et obésité

Une étude prospective sur 534 femmes a montré que l'augmentation du poids, le surpoids et l'obésité étaient proportionnellement liés à une forte présence en acides gras Oméga 6 dans les membranes phospholipidiques des globules rouges. L'augmentation du rapport Oméga 6/Oméga 3 augmente le risque de surpoids et d'obésité (Wang et al., 2016).

À l'inverse, une augmentation de la concentration en acides gras Oméga 3 dans les membranes des globules rouges s'associe à une diminution du risque de surpoids et d'obésité. Une étude a aussi montré qu'une alimentation riche en acides gras Oméga 3 modulait la satiété chez des personnes obèses ou en surpoids, pendant une phase de perte de poids, et aidait ainsi à la stabilisation du poids (Parra et al., 2008).

Une supplémentation en huile de lin chez des rats obèses a montré une chute importante de leur poids, avec une diminution de la glycémie, du taux de triglycérides (via la voie de la SERBP) et de cholestérol (via la diminution de la synthèse des VLDL) dans leur plasma (Laisouf et al., 2014).

6.2.2. Diabète de type 2

L'augmentation de la masse adipeuse viscérale, l'hypertriglycéridémie, l'insulino-résistance et l'hyper-insulinémie sont les symptômes d'un syndrome métabolique. Ce syndrome métabolique prédispose fortement au diabète de type 2. L'obésité, potentiellement induite par un excès d'apport alimentaire et excès d'apport en acides gras Oméga 6 induit une insulino-résistance en augmentant l'inflammation locale et en diminuant la sensibilité de l'insuline à ses tissus cibles. Cela se traduit par une diminution du captage du glucose par les muscles et par une augmentation de la production hépatique de glucose (Minihane et al., 2015). Mais tous les obèses ne sont pas diabétiques. Une étude a montré que les obèses non diabétiques avaient des taux de cytokines pro-inflammatoires et un degré d'infiltration du tissu adipeux par les macrophages significativement moins élevés que les obèses diabétiques (Barbarroja et al., 2010). Une alimentation moins inflammatoire, c'est-à-dire moins avec un ratio équilibré, serait donc protectrice contre le diabète. Une étude canadienne sur des individus à fort risque de diabète a montré qu'une supplémentation en graines de lin, riches en acides gras Oméga 3 améliore la sensibilité du foie et des muscles à l'insuline et diminue en 3 mois l'insulinémie et la glycémie (Hutchins et al., 2013).

6.2.3. Pathologies neurologiques

Les cellules microgliales sont des cellules immunocompétentes, qui assurent le maintien de l'homéostasie au niveau cérébral. Elles sont activées via des signaux moléculaires, par les cytokines pro-inflammatoires et sécrètent à leur tour des molécules de l'inflammation (cytokines, dérivés réactifs de l'oxygène) : on parle de neuro-inflammation. Une neuro-inflammation prolongée peut conduire à des processus neurodégénératifs, comme la maladie de Parkinson ou la maladie d'Alzheimer (Joffre and Layé, 2016).

Une récente étude sur des patients Alzheimer a montré que les concentrations sériques élevées des cytokines pro-inflammatoires étaient associées à une fréquence accrue de

symptômes neurodégénératifs observés dans la maladie d'Alzheimer, tels que la dépression, l'agitation ou encore l'anxiété (Holmes et al., 2011).

D'autres études épidémiologiques ont aussi montré que la dépression était associée à des taux importants de cytokines pro-inflammatoires circulantes (Dantzer, 2009).

Une consommation excessive d'acides gras Oméga 6 engendre une neuro-inflammation. À l'inverse, une consommation importante d'acides gras Oméga 3 est neuro-protectrice pour le cerveau. Les membranes cellulaires cérébrales incorporent préférentiellement les acides gras Oméga 3, et plus particulièrement le DHA. Il a été démontré in vitro que le DHA avait des propriétés anti-inflammatoires dans les cellules microgliales, via les résolvines (Smedt-Peyrusse et al., 2008). Plus récemment, des chercheurs ont montré qu'une administration d'EPA à des patients atteints de dépression diminue les marqueurs de l'inflammation et atténue les symptômes de la dépression (Rapaport et al., 2016).

6.2.4. Pathologies cardiovasculaires

L'athérosclérose (durcissement des artères) est l'une des principales causes des pathologies cardiovasculaires (Figure 18). Elle est principalement due à la formation d'une plaque d'athérome (accumulation lipidique) sur l'endothélium vasculaire. Cette fixation engendre l'altération de l'endothélium, ce qui provoque le recrutement des monocytes, qui pénètrent dans l'espace sous endothélial et se transforment en macrophages. Les macrophages sécrètent des cytokines pro-inflammatoires et des molécules qui fragilisent la plaque d'athérome, jusqu'à sa rupture, provoquant ainsi un thrombus (Hotamisligil, 2006). Ce processus thrombotique est responsable, au niveau des coronaires, d'épisodes angoreux instables et d'infarctus du myocarde. L'inflammation de bas grade favorise l'activation et le recrutement des monocytes et des macrophages au niveau de la plaque d'athérome, la rendant ainsi très instable et dangereuse (Hansson, 2005). Il est en effet démontré que les plaques les plus instables, et donc celles qui entraînent des processus thrombotiques sont celles qui sont les plus riches en macrophages. De nombreux scientifiques soutiennent que le marqueur inflammatoire est un meilleur prédicteur d'un accident cardio-vasculaire que la concentration de LDL dans le sang (Calder et al., 2009).

Une alimentation pro-inflammatoire est associée à une augmentation du risque cardiovasculaire (Ramallal et al., 2015).

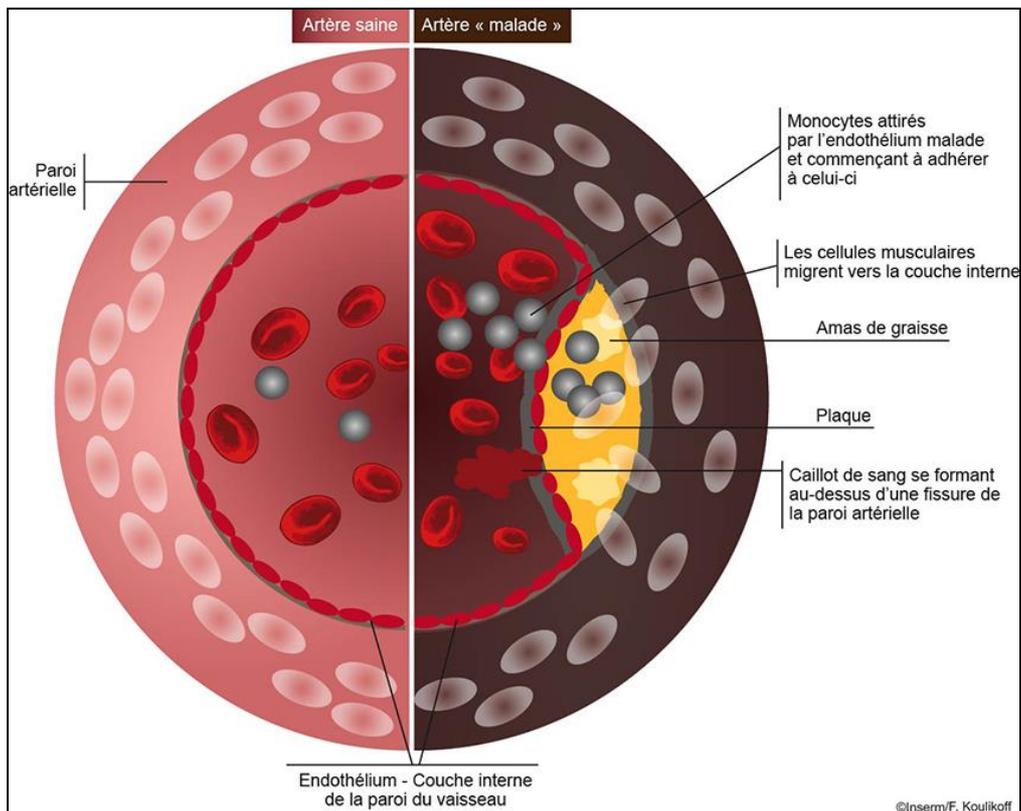


Figure 18 : Coupe schématique d'une artère saine et d'une artère athéroscléreuse (Koulikoff, 2014)

6.2.5. Pathologies inflammatoires

Une alimentation pro-inflammatoire, par excès d'acides gras Oméga 6 influe sur la composition de la flore bactérienne en diminuant le nombre de souches présentes (Power et al., 2014). Les rôles de la flore dans le maintien de l'immunité et de l'intégrité de la barrière du tractus gastro-intestinal peuvent donc être altérés. Plusieurs études semblent montrer qu'une atteinte du microbiote gastro-intestinal peut influencer sur le risque d'atteinte d'une pathologie cœliaque, d'une maladie inflammatoire de l'intestin (maladie de Crohn) ou d'une arthrite rhumatoïde (Belkaid and Hand, 2014). Or ces pathologies inflammatoires ont considérablement augmenté ces dernières années.

6.2.6. Cancers

L'inflammation de bas grade peut favoriser le développement de cellules cancéreuses. Une étude a montré qu'une mutation sur le gène codant pour le récepteur à l'IL-6, molécule pro-inflammatoire, constituait la première étape de la formation cancéreuse (Rebouissou et al., 2009). Un ratio Oméga 6/ Oméga 3 élevé semble favoriser le développement tumoral : plusieurs études ont montré que lorsque les cellules cancéreuses possédaient une enzyme Ω_3 -désaturase, enzyme capable de synthétiser rapidement l'ALA à partir de LA et l'EPA à partir de l'AA, le rééquilibrage du ratio Oméga 6/ Oméga 3 s'accompagnait d'une mort apoptotique des cellules cancéreuses (Kang, 2004). A l'inverse, les cellules cancéreuses ayant des ratios élevés ont continué à proliférer (Simopoulos, 2016).

La détection précoce de l'inflammation de bas grade serait très intéressante dans la prévention de ces pathologies. Il n'existe cependant pas encore de marqueurs

biologiques normalisés pour différencier une inflammation de bas grade d'une inflammation aigue.

-Le déséquilibre d'apport entre les Oméga 6 et les Oméga 3 dans notre alimentation a des répercussions physiologiques.

-Ce déséquilibre crée une inflammation de bas grade qui participe à l'émergence de maladies.

-Les grandes pathologies dites du 21^e siècle, comme les maladies cardiovasculaires, l'obésité, le diabète, les maladies neurologiques ou encore le cancer sont favorisées par ce déséquilibre entre les Oméga 6 et les Oméga 3.

Chapitre 4 :

Vers une alimentation santé

Le déséquilibre d'apport alimentaire entre les Oméga 6 et les Oméga 3 est commun à un grand nombre de pays industrialisés. Il s'est progressivement installé depuis ces 50 dernières années, participant à l'émergence concomitante de l'obésité et des grandes pathologies actuelles. Depuis une dizaine d'années, on constate un léger retour des consommateurs, vers une alimentation plus équilibrée, parce qu'ils se préoccupent de plus en plus de leur santé.

Les modifications du comportement alimentaire accompagnent généralement les grands changements sociétaux. Nous allons dans un premier temps décrire l'évolution des comportements alimentaires depuis la seconde guerre mondiale en France, puis dans un deuxième temps étudier comment obtenir un rapport Oméga 6/Oméga 3 plus équilibré dans notre alimentation.

1. Évolution du comportement alimentaire

1.1 Évolution de 1950 à 1980

Les habitudes alimentaires des Français ont beaucoup changé après la seconde guerre mondiale, à l'image de celles de l'ensemble des pays développés. Les progrès technologiques, et le développement socio-économique ont engendré des modifications profondes du mode de vie des Français, et notamment leur façon de consommer (E.C.K, 1990).

La mécanisation des tâches dans les domaines industriels et agricoles a permis de décharger les hommes des travaux fatigants, consommateurs d'énergie et de temps. Les moyens de transport deviennent multiples (voiture, trains, bus, métro) et le temps de marche journalier diminue. Les appareils ménagers (aspirateur, lave-vaisselle) facilitent le travail domestique. Toutes ces modifications entraînent une réduction des dépenses énergétiques dans la vie quotidienne des Français.

D'autre part, le développement du travail des femmes, associé à une hausse constante des salaires ont augmenté le pouvoir d'achat des ménages (Battagliola, 2010).

Des aliments bon marché comme le pain, les pommes de terre ou les légumes secs, consommés en grande quantité pendant la guerre, sont délaissés au profit de produits plus nobles, comme la viande, les œufs, le lait ou le poisson. En 40 ans, la consommation de pain et de pommes de terre a été divisée par 2 tandis que la consommation de viandes et de poisson a été multipliée par 2 (Figure 19).

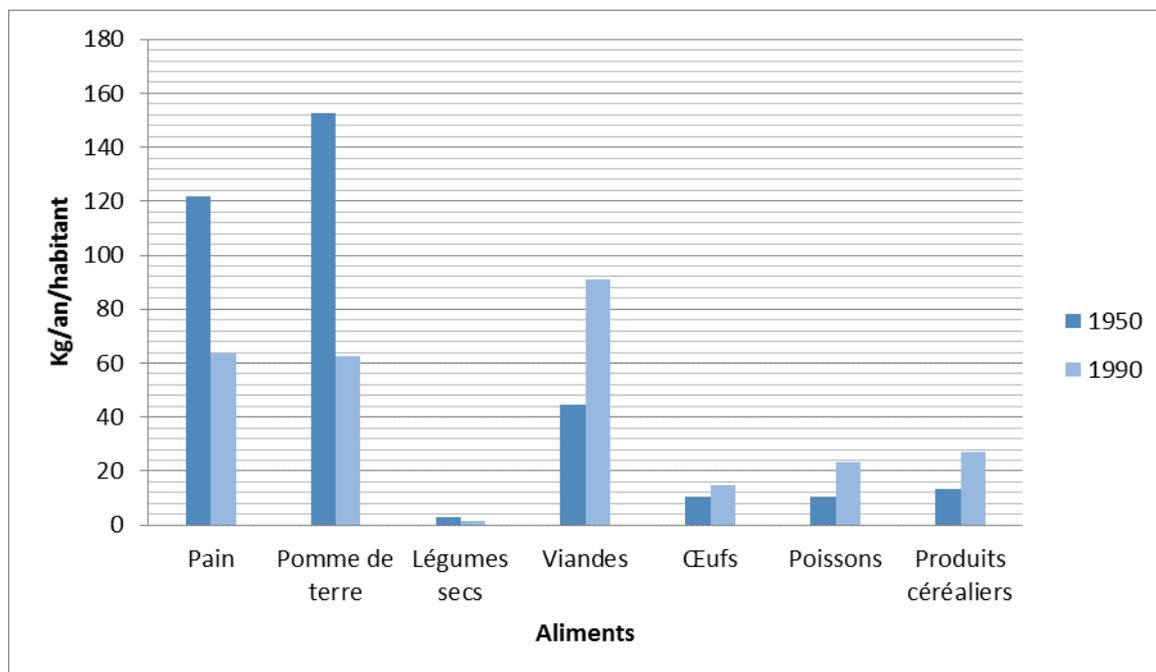


Figure 19 : Évolution de la consommation de différents aliments entre 1950 et en 1990, en kg/an/habitant, selon les données de l'annuaire statistique de la France

1.2 Évolution de 1980 à 2005

1.2.1. Consommation de masse

Le manque de temps pour cuisiner et l'augmentation du pouvoir d'achat entraînent une hausse des achats alimentaires. L'industrie de l'agro-alimentaire explose. Grâce à la mécanisation des exploitations agricoles, la production s'est intensifiée, pour voir apparaître des élevages industriels de poules, de bœufs et de cochons et des monocultures de blé et de maïs dans les champs (Griffon, 2013). Les progrès industriels ont permis la conservation, la distribution et la commercialisation de ces produits agricoles, à moindre coût en France, mais aussi en Europe et dans le monde. La mondialisation et l'ouverture des frontières sont à l'origine de l'arrivée de nouveaux aliments en France, tels que le kiwi ou les avocats qui se sont introduits dans nos assiettes. La notion de saisonnalité n'existe plus, tous les fruits et légumes peuvent être consommés toute l'année. Les Français ne manquent de rien, et consomment plus que ce dont ils ont besoin.

Les attentes de la population française continuent d'évoluer. Le bien-être et la réussite professionnelle deviennent primordiaux. Le développement personnel passe par un épanouissement dans les loisirs tels que le sport ou les voyages. La cuisine devient un passe-temps plus qu'une nécessité... Nos vies ne ressemblent que très vaguement à celles de nos grands-parents des années 1960, où les femmes prenaient le temps d'aller au marché pour choisir la viande et cuisinaient ensuite pendant presque 2 heures à chaque repas (Legrand, 2015) !

1.2.2. Assiette industrielle et « malbouffe »

Les consommateurs laissent désormais aux industriels le soin de préparer leurs aliments et leurs repas. Leur assiette se mondialise tantôt chinoise, tantôt congolaise, toujours poussée par les marchés les plus rentables. La part des produits transformés et préparés industriellement dans le budget des Français a doublé entre 1965 et 2005 (Figure 20). Basée sur le modèle américain, la restauration rapide type « fast food » se développe de manière exponentielle, et les Français sont de plus en plus nombreux à manger sur le pouce pour gagner du temps (Besson, 2008). Les mets servis sont des hamburgers, des sandwiches ou des pizzas, accompagnés de frites et de sodas (Monnet, 2010). Dans le même temps, les grandes surfaces multiplient leurs offres en produits industriels, riches en sucre, en sel ou en graisse, qui séduisent les consommateurs à grand renfort publicitaire (Chandon and André, 2015).

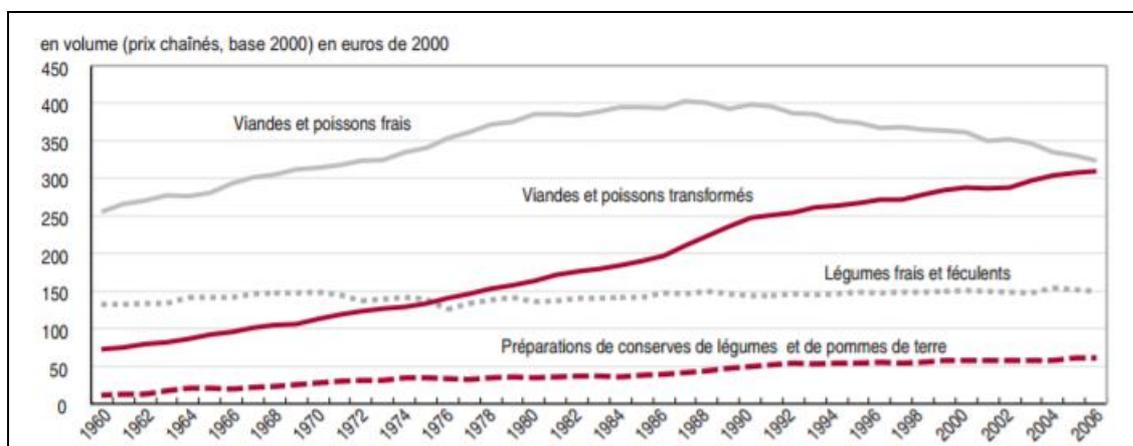


Figure 20 : Évolution des dépenses en euros de différents aliments par habitant en France (INSEE, 2000)

Une telle alimentation déséquilibrée, trop riche en calories, associée à une diminution de l'exercice physique est l'une des causes majeures de surpoids et de l'obésité. Grands fléaux du 21^{ème} siècle, ces pathologies touchent tous les pays développés et ceux en voie de développement. En 2025, on estime que le taux de surpoids atteindra 48% de la population dans les pays développés (Figure 21) soit près de la moitié de la population. En 2009, 15,5% des Français sont obèses contre 8,5% en 1997 (Laisney, 2011). Les Etats-Unis, berceau du fast-food comptent 38% d'obèses! L'obésité entraîne de nombreuses pathologies telles que le diabète, l'hypertension ou encore des pathologies cardiovasculaires développées au chapitre précédent. Elle est aussi associée à un risque accru de cancers.

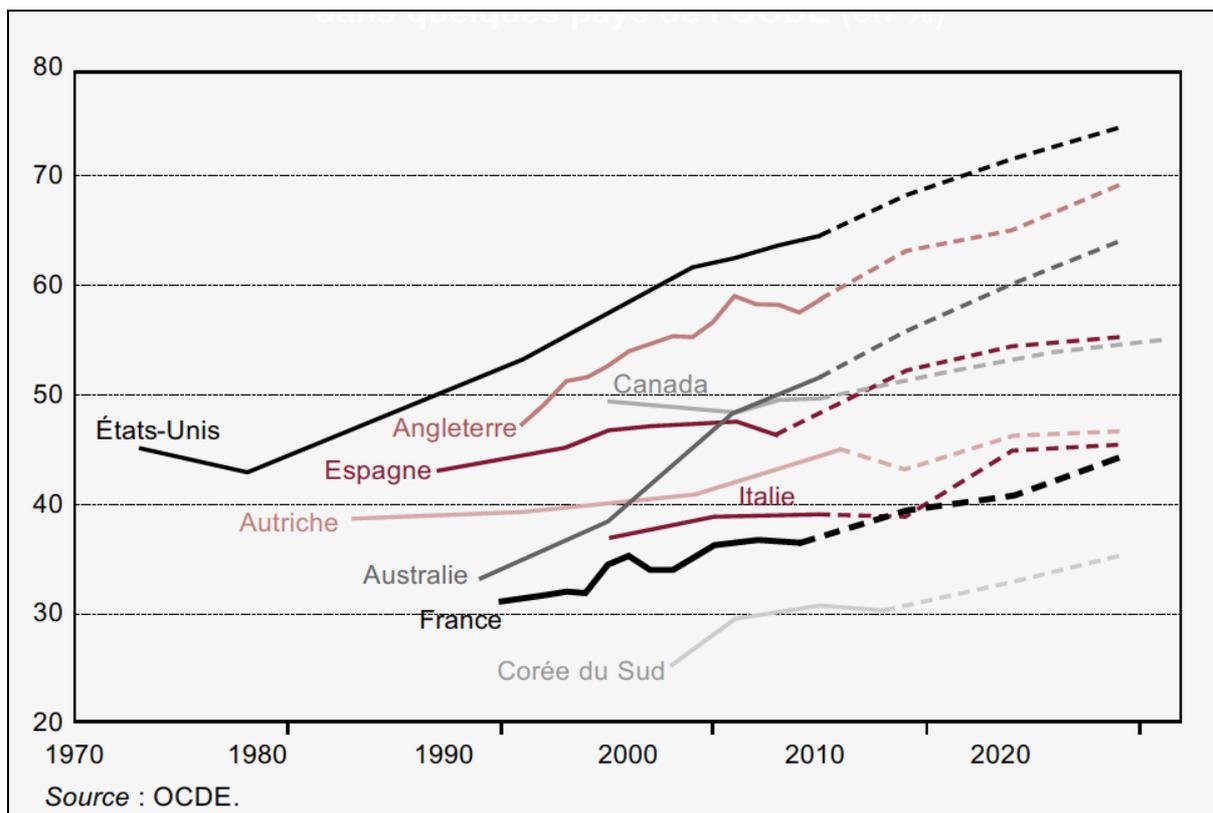


Figure 21 : Évolution du surpoids en % de la population en France et dans les pays développés (OCDE)

1.3 Vers une alimentation « santé »

De nos jours, l'alimentation est plus que jamais un moyen de préserver sa santé. À la question « Quel est le comportement le plus important pour préserver sa santé », 81% des Français répondent une alimentation variée, saine et équilibrée (Figure 22).

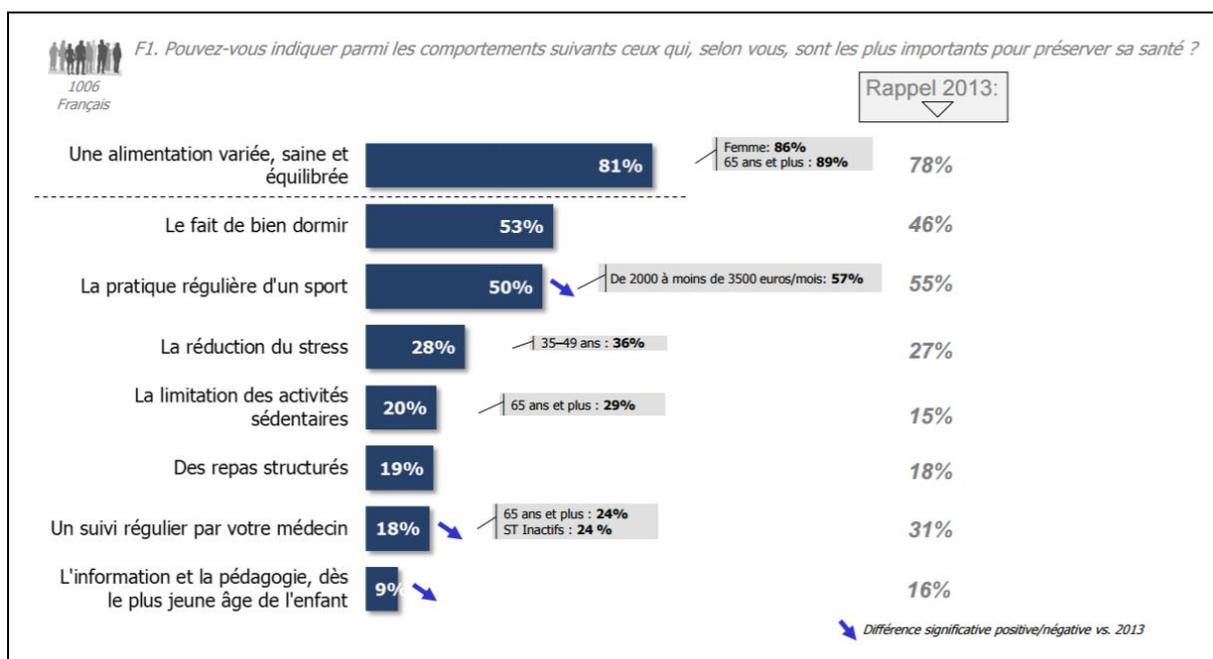


Figure 22 : Évolution de la perception du lien entre la santé et l'alimentation dans un panel de 1000 Français entre 2013 et 2016

La prise de conscience de la relation alimentation/santé ne cesse d'augmenter : + 12% en 3 ans (Figure 22). Elle a été amorcée au début des années 2000, notamment grâce à des mesures de Santé Publique de grande ampleur concernant l'alimentation.

1.3.1. Mesures de Santé Publique

En 2001, la lutte contre les mauvaises pratiques alimentaires et la sédentarité devient un enjeu majeur pour les pouvoirs publics. Ils créent alors le programme national nutrition et santé (PNNS), qui a pour but d'améliorer l'état de santé de la population par l'intermédiaire de la nutrition. Ses objectifs sont de réduire l'obésité dans la population générale, de la prévenir chez les jeunes enfants, d'augmenter l'activité physique pour éviter la sédentarité et d'améliorer les pratiques alimentaires des foyers. Pour cela, le PNNS met en place de larges campagnes de prévention et distribue des guides de nutrition ludiques et accessibles, dans tous les lieux publics et établissements santé (Herberg, 2003).

En 2007, à la demande de la ministre de la santé Madame Roselyne Bachelot, des messages sanitaires sont mis en place sur toutes les publicités alimentaires diffusées à la télévision, à la radio, dans les journaux ou sur les affiches de la grande distribution. Ce sont des messages simples et clairs, facilement mémorisables pour les enfants et les adultes. Par exemple, une étude sur l'impact des messages sanitaires réalisée par l'INPES révèle que 98% des enfants et 93% des adultes se souviennent du message « pour votre santé, manger au moins 5 fruits et légumes par jour » (Tableau 11) (Ayadi and Ezan, 2011).

Tableau 11 : Reconnaissance des messages sanitaires concernant l'alimentation, exprimée en % (Rajohanesa et al., 2009)

Messages sanitaires	Adultes	Enfants
Au moins 5 fruits et légumes par jour	93 %	98 %
Éviter de manger trop gras, trop sucré, trop salé	87 %	96 %
Pratiquer une activité physique régulière	83 %	90 %
Éviter de grignoter entre les repas	82 %	91 %

L'étiquetage nutritionnel des denrées alimentaires est un outil supplémentaire pour la diffusion d'informations concernant la santé et l'alimentation (Castetbon et al., 2011).

1.3.2. Autres facteurs influents

Outre les messages de santé publique, qui ont eu un réel impact sur la façon de consommer, notamment chez les plus jeunes, d'autres facteurs sociétaux, comme le vieillissement des populations ou encore les nombreux scandales sanitaires peuvent

contribuer à expliquer cet intérêt grandissant du consommateur, soucieux de l'impact de son alimentation sur sa santé et son environnement.

-Le vieillissement de la population

Depuis 1950, l'espérance de vie des Français n'a cessé d'augmenter, en partie grâce à l'amélioration des conditions de vie et l'accès aux soins médicaux de qualité. En 2015, l'espérance de vie pour les femmes était de 85 ans et de 78,9 ans pour les hommes (Jusot, 2016), soit 8 ans de plus que l'espérance de vie dans les années 80. On estime qu'en 2060, les séniors représenteront 1/3 de la population française (Blanpain et al, 2010). Vivre longtemps, mais surtout bien vieillir est devenue une préoccupation majeure. Pour 80% des séniors, le bien vieillir correspond à une bonne santé (Figure 23), et pour cela, de nombreux moyens de prévention sont mis en place ; garder une activité physique régulière, avoir une alimentation saine et être suivi régulièrement par un professionnel de santé. L'équilibre nutritionnel est devenu l'un des piliers du bien-vieillir (Mathé and Hébel, 2014).

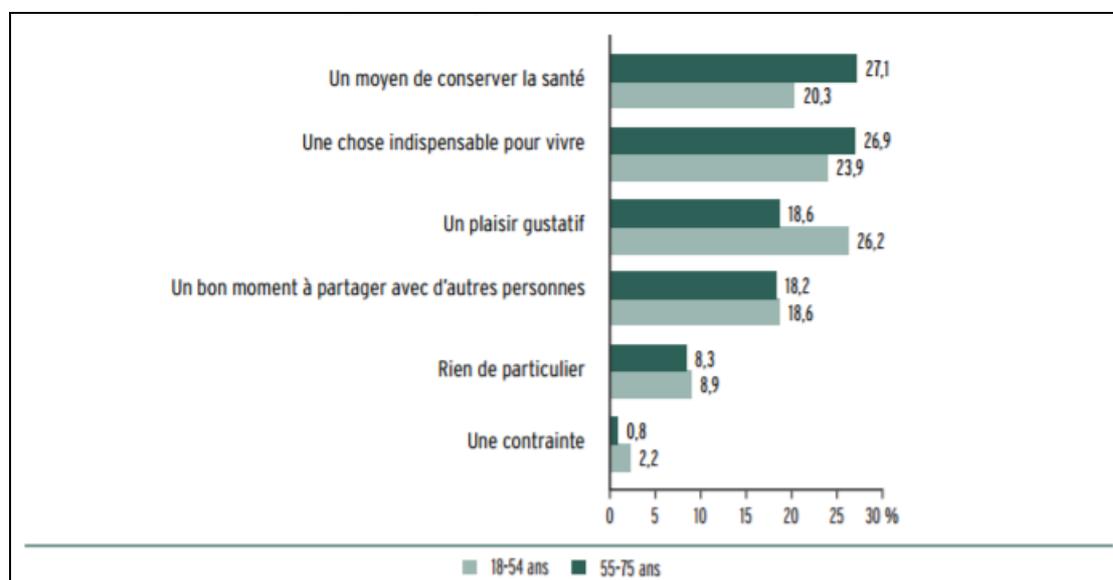


Figure 23 : Représentation de l'acte alimentaire selon l'âge, en % en 2008, (Escalon et al., 2009)

-Scandales sanitaires et retour aux circuits courts de distribution

Le retour au circuit court dans le domaine alimentaire est une tendance de ces dernières années, qui correspond à une demande grandissante des consommateurs. Les scandales sanitaires, dont le dernier en date fut la découverte de viande de cheval dans des lasagnes pur bœuf de Findus en Mars 2013 (Tableau 12), ont rendu méfiants les consommateurs vis-à-vis de la grande distribution (Giraud-Héraud et al., 2014). Les circuits courts, sont devenus synonymes de qualité dans l'esprit des gens, qui voient dans cette proximité un gage de terroir, de saveur et de fraîcheur des produits, et par raccourci, de produits sains (Laporte et al., 2015).

Tableau 12 : Historiques des crises alimentaires en France dans l'ordre chronologique (Hebel, 2016)

Dates	Evènements
1978	Huiles de colza
1980	Colorants et additifs (tract de Villejuif)
1987	Listéria dans le vacherin suisse
1988	Veau aux hormones
1989	Éclats de verre dans les petits pots pour bébés
1990	Benzène dans l'eau Perrier
1992-1993	Épidémie de listériose (langue de porc en gelée, rillettes, fromage et charcuterie à la coupe)
1993	Présence de verre dans les bières Bavaria/Heineken
1994	Salmonelle dans le jambon Marks et Spencer
1995	Listériose (brie de Meaux)
1996	Vache folle
1999	Présence de verre dans les bouteilles de Coca-Cola
1999	Crise du poulet
2001	Fièvre aphteuse
2005	Grippe aviaire
Juin 2011	Escherichia Coli-graines germées
Mars 2013	Fraude avec la viande de cheval

Les consommateurs qui n'ont pas accès aux circuits courts ou qui sont amenés à acheter des produits industriels recherchent des signes de qualité sur les emballages. Les produits labélisés, certifiés « fabriqués en France » ou « origine France » ont un fort impact sur leurs choix. Cette traçabilité sécurise les acheteurs, perdus entre la multitude des références proposées (Tavoularis et al., 2007).

La notion de santé devient un argument de vente, elle déclenche l'achat pour 88% des consommateurs. À la question seriez-vous prêt à acheter plus cher un produit ? L'intérêt pour la santé arrive en 2^{ème} position avec 68,3%, derrière l'attrait pour le goût chez 71,4% des consommateurs (Gaigner and Hebel, 2005).

2. Les allégations

2.1 Généralités et définition

Dans un souci d'information du consommateur et d'une incitation à la vente, des mentions ou messages sanitaires concernant les qualités nutritionnelles sont apparus

sur les emballages alimentaires : on parle d'allégations. Elles suggèrent qu'une denrée alimentaire possède des propriétés bénéfiques lors de sa consommation.

Ils existent deux sortes d'allégations : les allégations nutritionnelles, et les allégations de santé (Saillard, 2012). Pour harmoniser les messages portés par les allégations et pour éviter la publicité mensongère, les allégations furent réglementées au niveau Européen en 2006 (Règlement (CE) n°1924/2006, 2006). La législation indique entre autre qu'une allégation est autorisée seulement si l'effet bénéfique revendiqué est reconnu par le milieu scientifique et si le produit allégué est susceptible d'être consommé en quantité suffisante pour produire l'effet escompté.

-Les allégations nutritionnelles : Elles représentent l'ensemble des messages publicitaires qui énoncent ou suggèrent qu'une denrée alimentaire possède des propriétés bénéfiques particulières, par l'énergie qu'elle apporte, n'apporte pas ou apporte en proportion plus ou moins élevée (Article 2 du Règlement CE n°1924/2006). On trouve par exemple « riche en fibres », « sans sucres ajoutés » ou encore « faible teneur en matière grasse ». Elles concernent majoritairement les vitamines, les minéraux et la teneur en graisse.

-Les allégations de santé : Les allégations de santé, suggèrent ou impliquent l'existence d'une relation entre, d'une part, une catégorie de denrées alimentaires, une denrée alimentaire ou l'un de ses composants, et d'autre part, la santé (Article 2 du Règlement CE n°1924/2006). On distingue deux sous catégories ; les allégations de santé génériques et les allégations relatives à la réduction d'un risque de maladie ou se rapportant au développement et à la santé de l'enfant (Article 1 du Règlement CE n°1924/2006).

Les allégations santé répondent à une demande du consommateur, qui veut connaître explicitement les valeurs nutritionnelles des produits. Il recherche les produits porteurs de caractéristiques qualitatives (label, certification), gage de qualité et de produit sain (Gurviez, 2016).

2.2 Réglementation concernant les allégations sur les acides gras Oméga 3

L'intérêt scientifique pour les acides gras Oméga 3 et la découverte de leur rôle sur la physiologie de l'inflammation, sur le plan cardiovasculaire et cérébral ont entraîné une surmédiatisation des acides gras Oméga 3 aux yeux du grand public. Dans la quête du bien-être et du bien vieillir, les vertus des acides gras Oméga 3 se positionnent comme une véritable source de bonne santé, et sont devenues incontournables.

2.2.1. Allégations nutritionnelles

En France, 2 allégations nutritionnelles concernant les Oméga 3 peuvent être apposées sur les emballages des produits alimentaires selon le Règlement CE n°1924/2006, modifié le 9 février 2010 (Règlement (CE) n°116/2010, 2010).

-Source d'acides gras Oméga 3 pour les produits contenant au moins 30% des apports journaliers recommandés en Oméga 3 (Tableau 13).

-Riche en acides gras Oméga 3 pour les produits contenant au moins 60% des apports journaliers recommandés en Oméga 3 (Tableau 13).

Tableau 13 : Allégations nutritionnelles concernant les acides gras Oméga 3
(Règlement (CE) n°116/2010, 2010)

Allégations nutritionnelles	Conditions	Exemples
Source d'acides gras Oméga 3	Le produit contient au moins 0,3g d'ALA pour 100g et 100 kcal, ou au moins 40mg d'EPA et de DHA pour 100g et 100kcal.	Huiles et mélange d'huiles (huile 4 graines monoprix par exemple) Margarine
Riche en acides gras Oméga 3	Le produit contient au moins 0,6g d'ALA pour 100g et 100 kcal, ou au moins 80mg d'EPA et de DHA pour 100g et 100kcal.	Conserve de poisson gras

2.2.2. Allégations de santé

En 2012, la commission européenne a établi une liste des allégations de santé autorisées. Les allégations de santé qui concernent les acides gras Oméga 3 ne sont pas « relatives à la réduction d'un risque de maladie ou se rapportant au développement et à la santé de l'enfant » (Tableau 14), (Règlement (CE) n°432/2012, 2012).

Tableau 14 : Allégations de santé concernant les acides gras Oméga 3
(Règlement (CE) n°432/2012, 2012)

Allégations santé	Conditions
L'ALA contribue au maintien d'une cholestérolémie normale	L'allégation ne peut être utilisée que pour une denrée alimentaire qui est au moins une source d'ALA au sens de l'allégation « source en acides gras Oméga 3 » définie dans l'annexe du règlement (CE) n° 1924/2006. Le consommateur doit être informé que l'effet bénéfique est obtenu par la consommation journalière de 2g d'ALA.
Le DHA contribue au fonctionnement normal du cerveau	L'allégation ne peut être utilisée que pour une denrée alimentaire contenant au moins 40mg d'acide docosahexaénoïque (DHA) pour 100g et pour 100kcal. L'allégation peut être utilisée si le consommateur est informé que l'effet bénéfique est obtenu par la consommation journalière de 250mg de DHA.
Le DHA contribue au maintien d'une vision normale	L'allégation ne peut être utilisée que pour une denrée alimentaire contenant au moins 40mg de DHA pour 10 g et pour 100kcal. L'allégation peut être utilisée si le consommateur est informé que l'effet bénéfique est obtenu par la consommation journalière de 250mg de DHA.
L'EPA et le DHA contribuent à une fonction cardiaque normale	L'allégation ne peut être utilisée que pour une denrée alimentaire qui est au moins une source d'EPA et de DHA au sens de l'allégation « source en acides gras Oméga 3 » définie dans l'annexe du règlement (CE) n° 1924/2006. L'allégation peut être utilisée si le consommateur est informé que l'effet bénéfique est obtenu par la consommation journalière de 250mg d'EPA et de DHA.

Les allégations permettent de valoriser certains produits considérés comme nutritionnellement bons. Cependant, elles doivent être considérées avec prudence. Ce qui est le cas des allégations figurant sur les matières grasses. Elles peuvent être source de confusion entre les messages de santé publique, qui incitent à diminuer les apports lipidiques, et les allégations concernant les Oméga 3, synonymes de « bon pour la santé » dans l'esprit des gens.

L'allégation doit aider le consommateur à faire un choix entre produits similaires : il va préférer un produit porteur d'une allégation santé plutôt que celui qui n'en a pas. Il s'agit vraiment d'une substitution, et non d'une surconsommation tentante, sous prétexte d'une allégation alléchante telle que « riche en Oméga 3 », par exemple. Les aliments riches en Oméga 3 constituent le plus souvent une source importante de matière grasse ! (beurre, margarine, huile...) (Saillard, 2012).

3. Augmenter sa consommation en Oméga 3

Devant le déficit réel en acides gras Oméga 3 dans notre alimentation et malgré l'importance de leur rôle, pourtant majeur au niveau physiologique, la consommation de tout type d'aliments riches en Oméga 3 est fortement conseillée.

Les sources végétales d'acides gras Oméga 3, telles que l'huile de lin contiennent principalement de l'acide α -linoléique tandis que les sources animales comme le poisson sont riches en EPA et DHA (Tressou et al., 2016).

3.1 Les végétaux

La consommation d'huile végétale est le moyen le plus efficace pour augmenter ses apports en acides gras Oméga, type ALA. L'huile de lin et l'huile de noix sont des huiles très riches en Oméga 3.

L'huile de lin pure est constituée à 53,3% d'ALA. Longtemps interdite à la consommation pour son caractère instable lors d'un usage à chaud, elle est autorisée depuis 2010, après réévaluation de son intérêt nutritionnel (Morin, 2015). Autorisée seule ou en mélange avec d'autres huiles, la législation française lui impose un conditionnement en verre opaque ou en bidon de 250ml maximum, avec une date limite d'utilisation optimale inférieure à 9 mois (Avis Afssa, 2010). C'est une huile pauvre en antioxydant naturel ; sa teneur en tocophérol ne dépasse pas 40 à 60mg/100g. Elle se conserve donc difficilement.

L'huile de noix, contient 13% d'acides gras ALA et la même quantité de tocophérols que l'huile de lin (40 à 60 mg/100g) (Savage et al., 1999), ce qui la rend facilement oxydable. Son goût est très apprécié des consommateurs, mais son usage reste occasionnel.

Ces huiles sont uniquement destinées à l'assaisonnement et doivent être conservées au réfrigérateur maximum 3 mois après ouverture. Leur conservation reste difficile, malgré l'opacification des flacons et le froid. Le processus d'auto-oxydation commence en effet dès le premier pressage à froid de l'huile, une odeur et un goût rance peuvent alors survenir rapidement après ouverture du flacon, suite à la formation de produits secondaires volatils.

L'huile de colza est moins riche en ALA que l'huile de lin et l'huile de noix (Tableau 15), mais contient naturellement une forte concentration de vitamine E et son ratio LA/ALA est équilibré (Tableau 15). Elle représente un bon compromis entre facilité d'utilisation (bonne conservation, température maximale 180°C) et qualité nutritionnelle (teneur en ALA, ratio respectant les ANC). À utiliser pure, elle n'a que peu de goût, mais elle peut aisément remplacer l'huile de tournesol, comme huile de base dans les cuisines françaises.

Tableau 15 : Compositions des huiles en LA, ALA et rapport LA/ALA (Table Ciqual, 2016)

	Types d'huiles	LA, en g pour 100g d'huile	ALA, en g pour 100g d'huile	Rapport LA/ALA
Huiles riches en ALA dont la consommation est favorisée	Huile de lin	13,3	53,3	0,25
	Huile de colza	19,3	7,6	2,54
	Huile de noix	56,1	11,9	4,71
Huiles couramment utilisées en France	Huile d'olive	6,75	0,64	10,55
	Huile de tournesol	54,4	0,075	725,33

La qualité nutritionnelle est un facteur attractif pour le consommateur, mais le goût et le plaisir de consommer restent primordiaux. La consommation de mélanges d'huiles, combinées industriellement ou à la maison semble la meilleure des solutions pour allier qualité et plaisir gustatif.

On peut aussi manger une poignée de graines oléagineuses comme des noix ou des amandes, très riches en ALA, très bénéfiques pour la santé.

En terme d'absorption, la forme liquide des huiles favorise l'absorption des lipides (Raynal-Ljutovac et al., 2011). Mais les acides gras sont portés en majorité par les formes éthyl ester, qui les rendent très sensibles à l'oxydation. Cela peut expliquer leur mauvaise conservation et leur dénaturation à la cuisson.

3.2 Les animaux marins

Le poisson et ses produits dérivés constituent une source privilégiée d'Oméga 3. La chair des poissons est caractérisée par une grande richesse en EPA et en DHA (Tressou et al., 2016). L'abondance de ces acides gras dans le milieu aquatique s'explique par l'action du phytoplancton. Ce phytoplancton, à la base de la pyramide alimentaire marine, est capable de synthétiser l'EPA et le DHA à partir de l'ALA. Les acides gras sont ensuite ingérés par les mollusques et par les poissons : la composition en acides gras de leur chair reflètera celle de leur nourriture (Médale, 2010).

Leur teneur en acides gras varie selon les espèces. Les poissons dits gras, comme la sardine, le hareng, le saumon ou encore le maquereau ont une teneur moyenne de 3g d'EPA/DHA pour 100g. Les poissons considérés maigres comme le thon, le cabillaud, la raie ou la lotte ont une teneur de 0,3g d'EPA/DHA pour 100g (Table Ciqual, 2016).

Le PNNS recommande de consommer du poisson deux fois par semaine, dont une fois du poisson gras. Il faudrait préférer les petits poissons plutôt que les gros, qui accumulent des substances chimiques comme des dioxines ou du méthyl-mercure, néfastes pour la santé en cas de surexposition. La teneur en contaminants ne doit pas remettre en cause le bénéfice escompté de la consommation de poisson (Repères PNNS, 2016).

Ces recommandations sont toutefois difficiles à suivre, elles se heurtent à plusieurs difficultés :

La population mondiale atteint 7,4 milliards d'individus, la demande est énorme, et les ressources naturelles des mers et des océans s'appauvrissent de jour en jour, les espèces n'ayant pas le temps de se reproduire (FAO, 2016).

L'élevage reste une solution, qui présente malheureusement des limites : les poissons d'élevage nourris aux grains n'égalent pas leurs homologues sauvages en terme d'acides gras. L'engraissement des poissons aux grains, riches en Oméga 6 leur confère une composition lipidique déséquilibrée. Leur chair est très riche en Oméga 6 et pauvre en Oméga 3, avec un ratio Omega 6/Omega 3 élevé. Le poisson perd alors beaucoup de son intérêt nutritionnel (Médale, 2010).

En terme d'absorption, les acides gras des animaux marins sont majoritairement portés par des phospholipides (PL) et des triglycérides (TG). Ils sont donc facilement absorbables au niveau des entérocytes. La cuisson ne modifie pas la structure chimique des acides gras : les AGPI ne sont pas dégradés par la chaleur (Guillevic et al., 2007). Plusieurs études ont en effet montré que les acides gras se trouvant dans les membranes cellulaires (forme phospholipide) sont protégés de la destruction au cours de la transformation.

3.3 Les compléments alimentaires

La majorité des compléments alimentaires contenant des Oméga 3 sont fabriqués à partir de sources marines, riches en EPA et DHA. Leur principal intérêt est le potentiel concentrateur en acides gras Oméga 3 qu'ils peuvent apporter en une seule prise de gélule, sans autre apport en graisses. En effet, les teneurs en EPA et en DHA dans les huiles de poisson sont respectivement de 18% et de 12%. Après manipulation industrielle, on arrive à atteindre un taux global de 90% d'EPA et de DHA confondu dans un complément alimentaire.

Il existe des centaines de compléments alimentaires en matière d'acides gras Oméga 3, mais ils ne sont pas tous de la même qualité. Certains paramètres peuvent en effet altérer ces acides gras, ou diminuer leur biodisponibilité.

3.3.1 Structure chimique

La plupart des compléments alimentaires sont réalisés à partir d'huile de poisson. Cette huile de poisson subit à la fois une purification, pour la débarrasser de tous ses polluants (mercure, PCB) et à la fois une concentration de ses acides gras Oméga 3, pour être vendue sous forme de capsule, facile à ingérer et sans goût. Mais ces procédés modifient la forme des acides gras. Dans l'huile de poisson non transformée, les acides gras sont majoritairement portés par les triglycérides. Après transformation industrielle, ils sont majoritairement portés par des éthyl esters. Les études indiquent que chez l'homme, l'absorption des acides gras sous forme d'éthyl ester est largement moins efficace (presque 2 fois moins) que l'absorption des compléments alimentaires sous forme de triglycérides (Ghasemifard et al., 2014). Il est possible de reconvertir les acides gras sous forme de triglycérides synthétiques, appelés aussi TG réformés, au prix de procédés très coûteux, répercutés sur le prix de vente...Des compléments à base d'huile de krill (sorte de micro-crevettes qui se nourrissent uniquement de plancton) sont de plus en plus présents sur le marché du complément alimentaire en Oméga 3. Cette huile serait très riche en acides gras Oméga 3 sous forme phospholipidique (PL), et aurait donc une meilleure biodisponibilité.

Les acides gras Oméga 3 alimentaires, majoritairement présents sous forme de TG et de PL dans le poisson, et les œufs, ont, de manière générale, une meilleure biodisponibilité que les acides gras Oméga 3 contenus dans les compléments alimentaires classiques. Leur biodisponibilité est en revanche équivalente avec ceux des compléments alimentaires haut de gamme, où les acides gras sont sous forme de TG, de TG réformés, ou de PL.

3.3.2 Matrice

Les acides gras Oméga 3 ont une meilleure biodisponibilité lorsqu'ils sont absorbés avec une matrice, riche en graisses (Davidson et al., 2012). C'est naturellement le cas lorsque l'on consomme des huiles végétales riches en Oméga 3 ou des produits issus de l'enrichissement (acide gras mono-insaturés, saturés..) lors d'un repas (Schuchardt and Hahn, 2013). À l'inverse, les compléments alimentaires apportent seulement des acides gras Oméga 3 s'ils ne sont pas pris au moment d'un repas.

Les compléments alimentaires sont donc moins bien absorbés que les Oméga 3 alimentaires, sauf s'ils sont pris au moment d'un repas riche en graisse.

3.3.3 Formulation galénique et conservation

Les compléments alimentaires riches en Oméga 3 se présentent majoritairement sous forme de capsules molles, à avaler directement. Cette galénique a l'avantage d'être facile d'utilisation et de n'avoir aucun goût ; l'encapsulation à base de gélatine se dissout suffisamment lentement pour éviter d'avoir des relents de poisson après avoir ingéré la capsule. Cependant, le consommateur ne peut pas vérifier la fraîcheur de son complément alimentaire. En effet, l'évaluation sensorielle, qui est admise pour les aliments riches en Oméga 3 d'après l'ENSA n'est pas possible sur des capsules à avaler. Il serait judicieux d'ouvrir de temps en temps une capsule de complément alimentaire Oméga 3 pour s'assurer que l'odeur de l'huile n'est pas nauséabonde ! L'ajout d'antioxydant (tocophérol) est aussi une solution. La dose intégrée n'est cependant jamais précisée sur les emballages et il est donc impossible de juger de l'effet préventif de ces antioxydants sur l'oxydation des Oméga 3.

L'oxydation des acides gras dans les compléments alimentaires est un réel problème. Plusieurs études ont décrit des taux d'oxydation supérieurs aux limites autorisées et des teneurs en acides gras Oméga 3 largement inférieures à celles indiquées sur les emballages (Albert et al., 2015), (Jackowski et al., 2015).

Consommer plus d'acides gras Oméga 3, implique des modifications dans les habitudes alimentaires des consommateurs.

Les populations bien informées comprendront aisément tous les bénéfices d'un tel apport, mais les populations plus défavorisées et souvent les plus exposées aux déséquilibres nutritionnels ne sont pas aussi réceptives et sont plus réticentes à changer leurs habitudes alimentaires (Darmon and Carlin, 2013). De plus, les compléments alimentaires de bonne qualité sont chers (de l'ordre de 1€/capsule) et ne s'adressent qu'à une minorité de consommateurs.

Améliorer la qualité de produits de consommation courante, en les enrichissant en matière première riche en Oméga 3, de manière directe ou indirecte par l'intermédiaire d'un enrichissement animal est une alternative très intéressante.

-L' huile de lin est difficile à manipuler pour la cuisine. Elle est souvent présentée dans des mélanges d'huiles, pour augmenter sa stabilité.

-L'huile de colza présente un bon ratio Oméga 6 / Oméga 3 : elle peut aisément devenir l'huile de base dans les cuisines, en remplaçant l'huile de tournesol.

-Les Oméga 3 des animaux marins se conservent bien et sont bien absorbés. Mais l'accès à cette source en Oméga 3 est inégal sur le territoire (ville côtière ou non), et coûteuse (ressources limitées, donc chères).

-Les compléments alimentaires sont efficaces pour augmenter les apports en Oméga 3 seulement s'ils se présentent sous forme de PL ou de TG et s'ils sont associés à un antioxydant. Ouvrir régulièrement une capsule est une bonne précaution pour vérifier la fraîcheur de l'huile.

-Les compléments alimentaires Oméga 3 sont coûteux et ne s'adressent qu'à une minorité de consommateurs.

Chapitre 5 :

L'enrichissement

L'objectif de l'enrichissement consiste à compenser le manque d'apport en acides gras Oméga 3, via l'enrichissement des denrées alimentaires les plus consommées par la population.

Les faibles consommateurs de poissons et d'huiles végétales profiteraient alors aussi des effets bénéfiques des Oméga 3, sans changer leur alimentation. Cette approche vise à toucher le plus large public possible.

Il existe deux méthodes pour enrichir les aliments en oméga 3 :

-L'enrichissement direct : les aliments sont enrichis pendant leur fabrication, par ajout d'une source d'acides gras Oméga 3.

-L'enrichissement indirect, via l'alimentation du bétail : les produits animaux sont enrichis en acides gras Oméga, grâce à une supplémentation en Oméga 3 dans leur alimentation.

1. Enrichissement direct

L'enrichissement direct consiste à ajouter une matière première riche en Oméga 3 lors de la fabrication des denrées alimentaires. L'industrie agro-alimentaire enrichit d'autant plus de produits que l'argument santé est un argument de vente. Les matières premières utilisées pour enrichir les denrées peuvent être d'origine animale ou végétale.

1.1 Matières premières animales

Les huiles de poisson, riches en DHA et en EPA sont utilisées pour enrichir le lait, la crème, les yaourts ou encore le jus d'orange. Ce type d'enrichissement n'est pas très répandu, car il modifie les caractères organoleptiques des aliments enrichis (goût et odeur de poisson), ce qui peut rebuter les consommateurs, évidemment.

1.2 Matières premières végétales

Les huiles de lin et de colza, riche en ALA sont utilisées pour enrichir les margarines, les produits de boulangerie et les pâtes.

1.2.1 L'huile de lin et de colza

Les margarines sont les principaux produits enrichis en Oméga 3 d'origine végétale. Les huiles de lin et de colza sont utilisées pour les enrichir. Les rapports LA/ALA des margarines enrichies en Oméga 3 sont satisfaisants selon les ANC (<5), contrairement aux margarines classiques à base d'huile de tournesol (Tableau 16).

Tableau 16 : Rapport LA/ALA de margarines enrichies ou non enrichies

Types de margarines		Rapport LA/ALA
Margarines enrichies	Saint hubert 100% nature	2,6
	Saint hubert Oméga 3	2,8
	Primevère cuisson	3,9
Margarines non enrichies	Margarine tournesol	13,1
	Margarine tournesol allégée	19

Lors d'un enrichissement alimentaire en acides gras Oméga 3, l'industriel doit démontrer qu'au minimum 90% des acides gras ajoutés se retrouvent dans le produit fini, et tout au long de sa vie. L'oxydation des acides gras est donc contrôlée par l'ajout d'antioxydant dans la composition finale des produits enrichis.

Les matières grasses et les margarines sont les 5^{ème} pourvoyeurs d'acide gras dans l'alimentation des Français. Augmenter leur qualité semble donc très bénéfique. Cependant, si l'on respecte les rations journalières des margarines (20 gr) et des huiles (deux cuillères à soupe) préconisées par l'Anses, l'apport en ALA des margarines enrichies est très inférieur à celui d'une huile végétale, naturellement riche en Oméga 3 (Tableau 17).

Tableau 17 : Apport en ALA et % des ANC pour une ration journalière en lipides visibles (Couedelo, 2011)

Aliments	Apport alimentaire en ALA par portion de produits consommés	% ANC 2010 recouvert par apport d'une portion de produits consommés
Huile de lin	9,4	470
Huile de noix	2,4	120
Huile de colza	2,0	100
Margarine enrichie	0,8	40

1.2.2 La graine de lin entière

Les graines de lin apparaissent de plus en plus en boulangerie sur les pains spéciaux, pains aux graines, baguette aux céréales etc... En plus de donner au pain un aspect plus croustillant et une bonne odeur, les graines oléagineuses font vendre, pour leur richesse reconnue en fibres et en Oméga 3 (Marpalle et al., 2014). Mais contrairement aux idées

reçues, les graines de lin entières n'apportent aucun bienfait à l'organisme. En effet, les Oméga 3 et les fibres sont contenues à l'intérieur de la graine sous une paroi très épaisse, que seul un broyage préalable permet de fragiliser pour en libérer les composés. De plus, les graines doivent aussi être cuites pour inactiver les composés cyanogénétiques. Il en est de même pour les graines de lin en vente libre dans certains commerces. La digestibilité des graines est très faible, et la biodisponibilité des Oméga 3 l'est encore plus. D'autre part, lors d'un broyage simple, les composés toxiques et antinutritionnels ne sont pas détruits et les acides gras Oméga 3 de la graine sont exposés à l'oxydation une fois la paroi détruite (Bleu-Blanc-Cœur, 2016).

1.2.3 La farine de lin

La farine de lin est obtenue par un procédé de thermo-extrusion de la graine, qui sera expliqué dans le paragraphe suivant. La farine de lin est généralement associée à une autre farine, telle que la farine de blé ou de froment qui agissent comme un buvard et permettent une meilleure conservation des Oméga 3. La mise en sachet de la farine se fait sous atmosphère modifiée, et un extrait de romarin y est ajouté pour inactiver les molécules pro-oxydantes résiduelles. La farine ainsi obtenue peut se conserver 9 mois. Elle peut être utilisée en remplaçant 5 à 10% de la farine standard dans les préparations culinaires (quiche, gâteau, pain, crêpe, pâte...). Elle peut aussi être saupoudrée sur un yaourt ou une salade. Deux cuillérées à soupe seulement suffisent pour rééquilibrer nos apports en acides gras essentiels (Bleu-Blanc-Cœur, 2016).

L'enrichissement direct en petite quantité est un bon moyen d'augmenter les apports en Oméga 3. Mais le débouché de la filière lin en alimentation humaine est très peu développé (5 à 7% des débouchés) : peu de produits sont disponibles, et ceux qui sont présents sur le marché français sont des produits cibles, avec un marketing qui vise une population bien précise, à risque cardiovasculaire. Les margarines par exemple, portent souvent les allégations santé type « aide à diminuer le cholestérol ».

L'alimentation animale constitue le plus gros débouché des graines de lin, avec 90% des débouchés (Labalette et al., 2011).

2. Enrichissement indirect

2.1 Denrées alimentaires enrichies

L'enrichissement indirect consiste à enrichir l'alimentation animale en acides gras Oméga 3 pour modifier le profil lipidique des produits à consommation humaine, et ainsi augmenter l'apport en acides gras Oméga 3 chez les Français. Intervenir à la base, sur l'alimentation des animaux, pour au final, modifier les apports en Oméga 3 chez l'homme est un moyen efficace pour améliorer les qualités nutritionnelles des produits alimentaires (Bourre, 2004).

Les premiers essais d'enrichissement animal se firent sur des poissons. Mais l'enrichissement du poisson ne permet pas au plus grand nombre d'accéder à cette source d'Oméga 3 (Médale, 2010).

Les animaux d'élevage d'origine terrestre ne sont pas considérés comme une « bonne source » en Oméga 3. Mais paradoxalement, la viande, les produits laitiers ou les œufs sont la principale source d'apport alimentaire en Oméga 3 des Français (INCA 2, 2006).

La consommation de ces produits est en effet très forte ; même si l'on constate une baisse régulière en France depuis une vingtaine d'années, la consommation de produits animaux en France est nettement plus élevée que la consommation mondiale. En France, on estime la consommation annuelle par habitant à 86,3kg de viande (FranceAgrimer, 2014) et à 230 d'œufs (FranceAgrimer, 2016a), tandis que la consommation mondiale de viande est de 42,9kg/an/hab. et la consommation mondiale d'œufs en moyenne de 145 œufs/an/hab. (FAO, 2012). De manière générale, la consommation de produits animaux connaît une hausse constante depuis le siècle dernier, expliquée en partie par l'augmentation de la consommation de viande dans les pays développés et les pays en voie de développement (Figure 24).

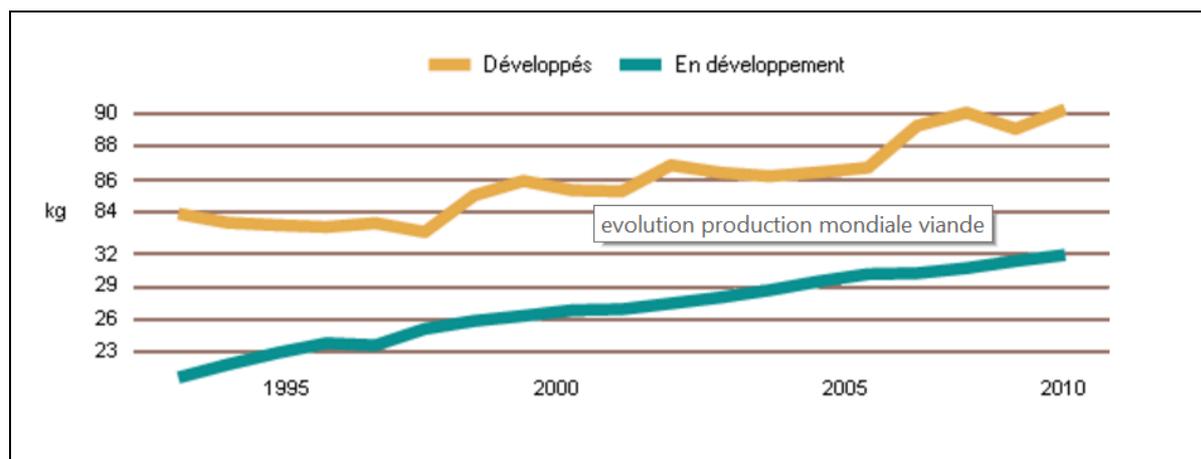


Figure 24 : Évolution de la consommation de viande dans les pays développés et les pays en voie de développement (FAO, 2009)

Pour satisfaire la demande, la production mondiale de viandes, d'œufs et de lait n'a cessé d'augmenter, et la production en quantité a supplanté la production de qualité.

La production mondiale de viande est passée de 45 millions de tonnes en 1950 à 302 millions de tonnes en 2012 tandis que la production d'œufs double tous les 10 ans (FAO, 2012). Parallèlement, une meilleure connaissance des besoins énergétiques des animaux, et la volonté d'une production en grande quantité a entraîné une modification du mode d'alimentation des animaux d'élevage en France. L'herbe et les fourrages de luzerne, ou de lupin, sources végétales d'Oméga 3 ALA, ont laissé place à une alimentation plus énergétique, à base de soja importé d'Amérique du Sud et d'huile de palme, peu chère, favorisant l'engraissement de l'animal. Au niveau lipidique, ces matières premières sont riches en Oméga 6, et pauvres en Oméga 3. L'apport énergétique trop important du soja favorise le stockage sous forme de graisses saturées. La composition en acides gras des animaux s'est alors modifiée quantitativement, avec plus de graisses saturées et qualitativement, avec des excès d'apport en Oméga 6, aux dépens des Oméga 3. Bien que moins riche en lipides que les viandes de l'après-guerre (sélection des animaux destinés à la vente), la viande a perdu de sa qualité ; elle est devenue déséquilibrée, riche en acides gras saturés, pauvre en acide gras Oméga 3 et avec un rapport Oméga 6/Oméga 3 trop élevé. Il en est de même pour les produits laitiers et les œufs, la composition lipidique de ceux-ci étant directement liée à l'alimentation des poules d'élevage.

Le retour à une agriculture locale, avec des animaux d'élevage nourris à l'herbe et au fourrage, semble difficile au vu du nombre croissant de personnes à nourrir dans le monde. Pour retrouver une qualité des produits animaux, et pour augmenter sa consommation en acides gras Oméga 3, l'enrichissement de l'alimentation animale à

partir de végétaux riches en Oméga 3 est une solution. Un animal mieux nourri, nourrira à son tour mieux les hommes.

2.2 Modalités d'enrichissement

2.2.1. Les animaux monogastriques et polygastriques

La qualité nutritionnelle de la viande dépend de la quantité de lipides qu'elle contient, et de la qualité des acides gras. La teneur en lipides est fortement influencée par les facteurs génétiques, l'âge, le sexe ou les conditions d'élevage des animaux. La qualité des acides gras est quant à elle, plus ou moins impactée par l'alimentation, suivant s'il s'agit d'animaux polygastriques ou d'animaux monogastriques (Chilliard et al., 2008). Les animaux dits polygastriques possèdent un estomac constitué de plusieurs poches, comme la panse et le rumen. C'est le cas des bovins et des ovins, chez lesquels on retrouve dans le rumen des bactéries, qui hydrogènent les acides gras polyinsaturés apportés par les végétaux. Ainsi, 80% des Oméga 6 et 90% des Oméga 3 sont détruits et métabolisés en acides gras mono-insaturés *trans* et en acide linoléique conjugué (CLA). De ce fait, la viande des animaux polygastriques est moins riche en AGPI et dépend peu de la nature des acides gras apportés par l'alimentation (Doreau and Ferlay, 2015). Ce phénomène de destruction des AGPI est inexistant chez les animaux monogastriques comme le cochon, le lapin ou les volailles, et l'enrichissement de leur alimentation en Oméga 3 présente un intérêt certain (Mourot, 2010).

2.2.2. Les vecteurs d'enrichissement

La principale source d'enrichissement en Oméga 3 pour les animaux est la graine de lin. D'autres sources de graines, comme la luzerne, le colza ou le chanvre peuvent aussi être utilisées, mais ne sont pas assez économiques à long terme. Les graines de lin crues, comme de nombreuses graines oléagineuses, ne sont pas digestes pour l'homme et l'animal. Elles subissent donc un procédé de thermo-extrusion, qui consiste à cuire les graines sous pression (Valorex, 2015). Les étapes de l'extrusion sont :

- Le broyage de la graine, qui libère les matières grasses, on obtient une pâte.
- La cuisson de la pâte, par trempage et mouillage dans de la vapeur d'eau à 100-150°C.
- L'extrusion de la pâte, par pression de celle-ci en continu sur les parois du four. L'extrusion rend les Oméga 3 disponibles à hauteur de 85%, alors que la biodisponibilité n'était que de 10% pour la graine de lin entière.
- Le séchage de la pâte extrudée, avec de l'air chaud permet l'élimination de la phase aqueuse.

L'enrichissement à base de graines de lin extrudées semble plus efficace que l'enrichissement à base d'huile ou de graines entières pour augmenter la teneur en Oméga 3 de la viande, du lait et des œufs; elles sont en fait plus digestes et donc mieux assimilées par les animaux.

2.3 Les animaux monogastriques

La viande de porc est une viande naturellement riche en acides gras Oméga 6 et pauvre en Oméga 3. La ration alimentaire du porc est en effet constituée majoritairement de céréales (blé, maïs) et d'oléo-protéagineux (soja, pois), riches en acides gras Oméga 6 et pauvres en acides gras Oméga 3, auxquels sont ajoutées des matières grasses

généralement d'origine végétale. Sa capacité d'enrichissement est très intéressante. D'une part, enrichir la ration alimentaire du porc est aisée : il a un petit estomac et mange plusieurs fois dans la journée ce qui facilite sa digestion, et il est habitué à ne manger que des céréales ou des oléo-protéagineux. D'autre part, le porc est l'animal le plus consommé, en France ; sa viande est en effet peu chère, et entre dans la composition de nombreuses charcuteries comme le saucisson sec ou le pâté de campagne, très appréciées, mais souvent décriées pour leur réputation d'être trop riches en matières grasses (Turner et al., 2014).

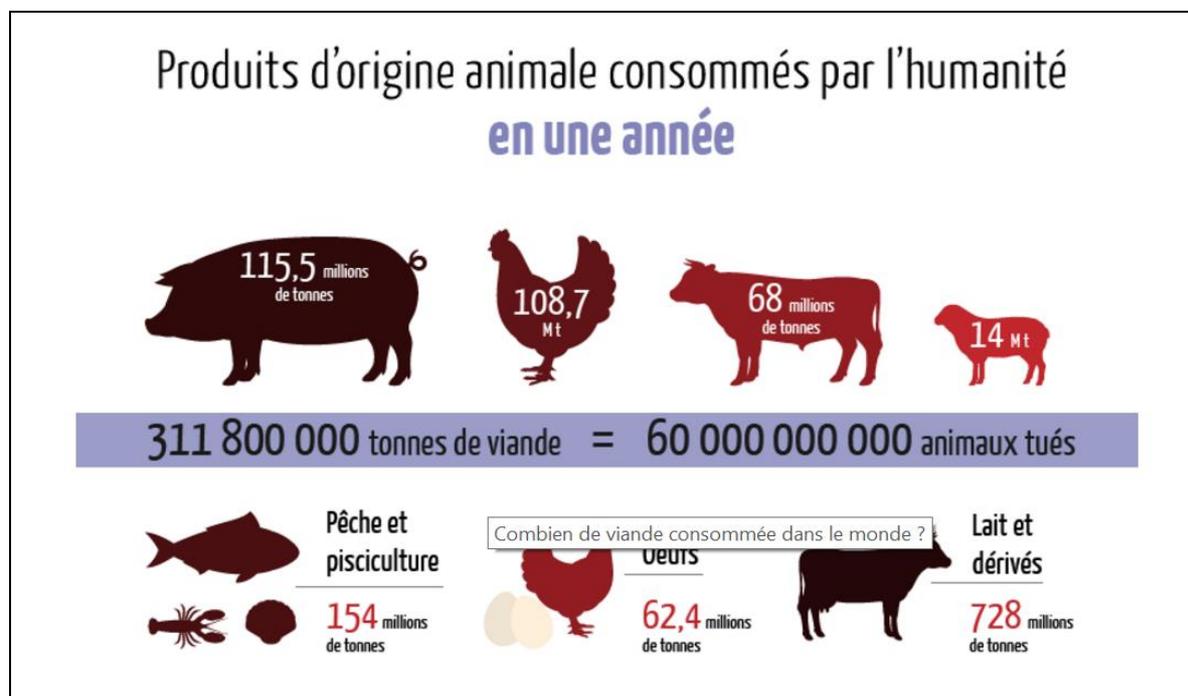


Figure 25: Principaux produits d'origine animale consommés en 2013 (Planetoscope)

La viande de porc est aussi la viande la plus consommée dans le monde, avec 115,5 millions de tonnes par an, suivie par la consommation de volailles, avec 108,7 millions de tonnes par an (Figure 25). Une amélioration du rapport Oméga 6/ Oméga 3 de la viande de porc, actuellement égal à 30/1 pour un élevage standard participerait à un meilleur équilibre nutritionnel chez l'homme (Dugan et al., 2015).

L'enrichissement du porc s'effectue à l'aide de graines de lin extrudées, que l'on ajoute à hauteur de 3 à 5% de la ration alimentaire à la place de la source lipidique habituellement apportée. Les régimes standards et enrichis sont iso-lipidiques chez le porc (Turner et al., 2014).

Tableau 18 : Comparaison des teneurs en Oméga 3 et du rapport Oméga 6/ Oméga 3 entre un rôti de porc issu d'un porc standard et d'un porc enrichi (Bleu-Blanc-Coeur, 2016)

	Roti de porc standard	Roti de porc enrichi
Oméga 3 en g/100g	0,9	2,5
Oméga 6/Oméga 3	10,8	4

La teneur en Oméga 3 de la viande de porc est multipliée par 2,8 lors d'un enrichissement de l'alimentation du porc. Le ratio Oméga 6/ Oméga 3 est largement diminué (Tableau 18).

Notons ici que le porc ne possède pas les enzymes nécessaires à la conversion de l'acide α -linoléique en EPA et en DHA (Alessandri et al., 2009). L'augmentation de la teneur en Oméga 3 est donc principalement due à l'augmentation de la teneur en ALA dans la viande de porc.

L'enrichissement en graines de lin de la ration du porc permet également l'amélioration de la qualité nutritionnelle de la charcuterie.

Tableau 19 : Composition et teneurs en acides gras de deux régimes expérimentaux chez des porcs (AGS : Acides gras saturés, AGM : Acides gras mono-insaturés, AGPI : Acides gras polyinsaturés) (Guillevic et al., 2007)

	Régime témoin	Régime lin
Composition en AG en %	3,01	3,19
AGS	23,2	17,0
AGM	24,7	21,8
AGPI	52,1	61,2
Rapport n-6/n-3	12,50	1,46

Une alimentation riche en graines de lin extrudée (4,5% du régime alimentaire) chez le porc engendre des produits de charcuterie significativement plus riches en ALA que ceux issus des porcs nourris avec une alimentation standard. Le régime lin des porcs permet de réduire le ratio Oméga 6/Oméga 3 de la charcuterie qui en découle de 88%, en passant de 12,5 à 1,46 (Tableau 19).

Certaines charcuteries comme le pâté de campagne ou le saucisson restent des aliments riches en graisse et une consommation journalière ne serait pas en accord avec les ANC concernant les apports lipidiques dans l'alimentation (inférieur à 40% des AESA).

Mais un apport de charcuterie provenant de viande de porcs enrichis en graines de lin extrudés dans un repas équilibré, contribue à atteindre les objectifs de consommation de 2,5g d'acides gras Oméga 3 par jour avec le maintien du ratio Oméga 6/ Oméga 3 strictement inférieur à 5 (Figure 26).

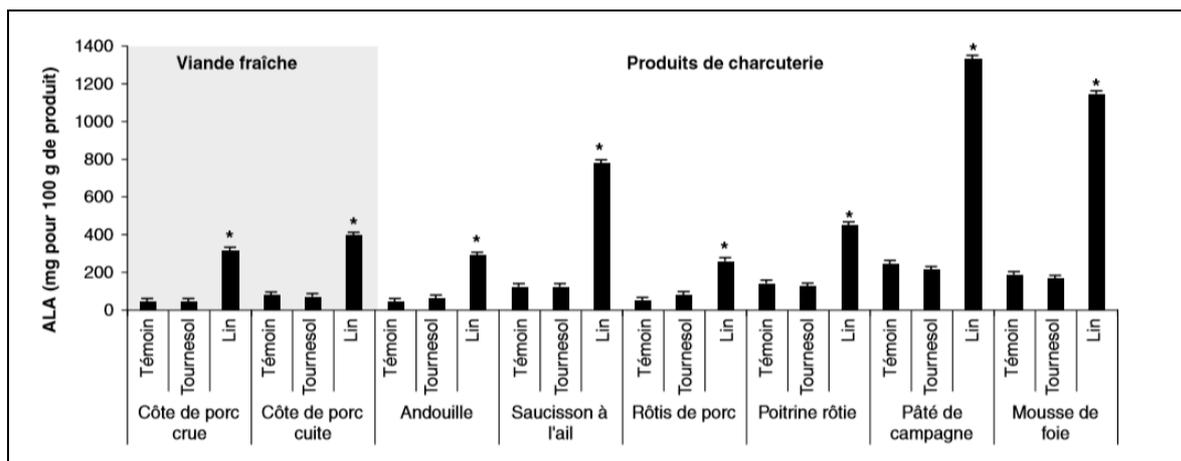


Figure 26 : Effet d'un régime riche en graines de lin extrudées sur la composition en ALA de produits de charcuterie, par rapport à un régime témoin et un régime riche en graines de tournesol (Guillevic et al., 2007)

2.3.1. Les volailles

Les volailles ont la particularité d'être des viandes maigres (Mourot, 2010). Nous prendrons l'exemple du poulet pour ce chapitre, qui est sans conteste la volaille la plus consommée.

D'après la base de données Ciqual, une cuisse de poulet contient 0,053g d'acides gras Oméga 3 pour 100g de cuisse de poulet, dont la moitié de ces acides gras est représentée par le DHA. Les volailles sont en effet les seuls animaux terrestres à posséder les enzymes capables de métaboliser l'ALA en EPA et en DHA. Un enrichissement de l'alimentation en graines de lin extrudées est d'autant plus intéressant qu'il permettrait d'augmenter à la fois la teneur en ALA mais aussi la teneur en DHA de la viande de poulet, acide gras dont on connaît tous les bienfaits (Mourot, 2010).

Tableau 20 : Comparaison de la teneur en Oméga 3 et du rapport Oméga 6 / Oméga 3 entre poulet entier standard et d'un poulet entier enrichi (Bleu-Blanc-Coeur, 2016)

	Poulet entier standard	Poulet entier enrichi
Oméga 3 en g/100g	1,9	8
Oméga 6/Oméga 3	10,8	2,5

Le poulet enrichi est 4 fois plus riche en acides gras Oméga 3 que le poulet standard, ce qui diminue le ratio Oméga 6/ Oméga 3 de $\frac{3}{4}$ de sa valeur (Tableau 20).

Une autre étude indique que la teneur en DHA est doublée dans la viande de poulet lors d'un enrichissement en graines de lin extrudées (Konieczka et al., 2017). Étant donné les apports très faibles en DHA dans l'alimentation, le poulet enrichi est un bon vecteur d'enrichissement pour l'homme, à la fois pour rééquilibrer le ratio Oméga 6/ Oméga 3 et à la fois pour se rapprocher des ANC du DHA (250mg/jour).

2.3.2. Les œufs

La consommation moyenne en France est de 5 œufs par semaine. Un œuf moyen de 60g contient environ 5,9g de lipides, condensés dans le jaune de l'œuf, ce qui est une source non négligeable de lipides dans l'alimentation humaine. Les acides gras majoritaires du jaune de l'œuf sont des acides gras saturés et des acides gras mono-insaturés, qui représentent respectivement 33,2% et 46% des acides gras totaux du jaune d'œuf (Pieroni and Coste, 2010). La teneur en acides gras Oméga 3 est faible, représentant moins de 2% des acides gras totaux. Le DHA est constitutif des acides gras Oméga 3 du jaune l'œuf à hauteur de 60% (Tableau 21). Cela vient du fait que la poule possède le bagage enzymatique nécessaire au métabolisme endogène de l'EPA et du DHA à partir de ALA. Le ratio LA/ALA est proche de 10 (Tableau 21).

La composition en acides gras de l'œuf, et plus particulièrement les teneurs en LA et ALA sont liées à l'alimentation de la poule pondeuse et à ses conditions d'élevage. Une alimentation riche en ALA induit de manière linéaire une augmentation du taux d'ALA dans l'œuf. Il en est de même pour l'acide linoléique ; les poules nourries de manière intensive au maïs ou au soja sont riches en Oméga 6 (Yi et al., 2014). Dans le Morbihan, une expérience a été réalisée à raison d'un apport de 2,5% de graines de lin extrudées dans l'alimentation des poules pondeuses : la teneur en Oméga 3 du jaune d'œuf a été multipliée par 4. Selon les tests au laboratoire, le ratio O6/O3 a été divisé par 4 : il est passé de 15 à 3,9 (Bleu-Blanc-Cœur, 2016).

On considère désormais que l'introduction de graines de lin extrudées dans l'alimentation des poules pondeuses permet d'augmenter de 75% la teneur en Oméga 3 du jaune de l'œuf et divise le ratio Oméga 6/ Oméga 3 par 3 (Tableau 21).

Tableau 21 : Comparaison de la teneur en acides gras des œufs issus d'une filière standard et des œufs issus d'une filière lin

Acides gras en g/ 100g	AG tot	AG sat	AG mono-insaturés	AGPI Oméga 6	AGPI Oméga 3	Ratio O6/O3
Filière standard	7,95	2,64	3,66	1,50	0,151 (dont 0,061 en ALA et 0,09 en DHA)	9,9
Filière lin	9,5	3,00	4,2	1,68	0,59	2,9

Ce tableau est réalisé à partir des données nutritionnelles d'un œuf cru dans la base Ciqual et des données nutritionnelles d'un œuf de filière lin (issu d'une alimentation enrichie en lin des poules à hauteur de 2,5% de graine de lin). Les données sont difficilement comparables dans ce tableau, puisque les méthodes de mesure ne sont pas les mêmes, et les œufs ne viennent pas d'un même élevage, mais cela permet d'avoir un ordre de grandeur.

La composition en acides gras Oméga 3 des œufs enrichis n'est pas précisée, mais on peut supposer que l'augmentation de la teneur en Oméga 3 résulte de l'augmentation de la teneur en ALA, mais aussi de celle en DHA, grâce au métabolisme de ALA en EPA et en DHA. Manger un œuf enrichi permettrait de couvrir plus de 10% des besoins journaliers en DHA et contribuerait à diminuer la consommation d'acides gras saturés de 300mg/jour (Guillevic et al., 2009).

On atteint des résultats satisfaisants en seulement deux semaines d'enrichissement. À long terme, les poules dont l'alimentation est enrichie en graines de lin extrudées ont tendance à être moins malades que les poules bénéficiant d'un régime standard.

L'œuf enrichi ne présente aucune modification de goût (Yi et al., 2014). Ses qualités nutritionnelles lui permettent d'accéder aux allégations « source en acides gras Oméga 3 », contrairement aux œufs bios ou fermiers. En effet, un œuf de poule nourrie au maïs et au tournesol de culture biologique est un œuf riche en Oméga 6 et pauvre en Oméga 3. Le consommateur doit rester vigilant et ne pas associer systématiquement le concept « bio » avec « bon pour la santé ».

La consommation d'œufs issus de poules enrichies est d'un grand intérêt pour la santé humaine : consommer un œuf par jour apporte 350mg d'Oméga 3, soit 14% des ANC. Si l'on tenait compte de l'ensemble des préparations faites à partir d'œufs (quiche, tarte, gâteau pâtisserie..), on pourrait aisément atteindre 30% des ANC journaliers en Oméga 3, grâce à cet enrichissement.

Il faut néanmoins préciser que l'œuf enrichi est plus riche en acides gras totaux qu'un œuf standard. Il serait dans l'intérêt des consommateurs de baisser la consommation de 5 œufs par semaine à 4 œufs par semaine pour ne pas dépasser les ANC en termes de lipides. Le taux de cholestérol diminue légèrement dans les œufs enrichis ; de 377mg/100g pour un œuf standard, à 335mg/100g pour un œuf enrichi. (Table Ciqua 2016), (Bleu-Blanc-Cœur, 2016).

2.3.3. Le lapin

La viande de lapin jouit traditionnellement d'une bonne image, au point de vue nutritionnel. La luzerne, traditionnellement utilisée à hauteur de 15 à 20% dans sa ration alimentaire, lui procure une source de fibres, de protéines, et d'acides gras Oméga 3. C'est en effet une source en acide α -linoléique (ALA). La viande de lapin est la viande la plus riche en ALA (2,47%). Son rapport LA/ALA, de 3,1 est équilibré et satisfait aux ANC de 2010 (Teillet et al., 2013).

Enrichir l'alimentation du lapin ne présente pas réellement d'intérêt nutritionnel pour le consommateur, mais l'image d'une viande nutritionnellement bonne dans l'esprit des consommateurs est renforcée par la présence des Oméga 3, et fait vendre. Les morceaux issus de viande de lapin enrichi peuvent prétendre à l'allégation « source en acides gras Oméga 3 ». La consommation de lapin reste cependant très faible ; moins de 2kg par habitant, et son enrichissement n'a pas que très peu d'impact.

2.4 Les animaux polygastriques

2.4.1. La viande de bœuf

Malgré un faible impact de l'alimentation des bovins sur la teneur en acides gras de leur viande, on constate tout de même une légère augmentation du taux en ALA de la viande lorsqu'arrive le printemps et que les animaux se nourrissent de pâturages, plus riches en Oméga 3 que les céréales données en hiver. L'enrichissement peut donc avoir un intérêt nutritionnel pour la viande de bœuf, d'autant plus que la consommation de celle-ci est élevée.

L'enrichissement des bovins se traduit par l'apport de graines de lin extrudées dans leurs rations alimentaires, principalement dans les rations d'hiver, sans dépasser 3% de la ration totale. Au-dessus de 3%, la digestion devient difficile pour les animaux. Les

résultats sont quantifiés : la teneur en acide α -linoléique de la côte, d'un bœuf enrichi en graine de lin extrudée, est 2,7 fois plus importante que celle d'une côte de bœuf standard. Le ratio Oméga 6/Oméga 3 est divisé par 4, justifiant l'enrichissement de l'alimentation du bœuf pour la consommation de sa viande (Tableau 22).

Il faut cependant noter que tous les paramètres de l'enrichissement chez le ruminant ne sont pas connus. En effet, l'augmentation en AGPI va de pair avec l'augmentation de la production de l'acide ruménique et de l'acide linoléique conjugué ($\times 3$ avec l'enrichissement). On ne connaît pas encore réellement l'impact de ces acides gras sur la santé de l'homme (Doreau and Ferlay, 2015).

Tableau 22 : Comparaison des teneurs en matières grasses, acide gras Oméga 3 et rapport Oméga 6/Oméga 3 entre une côte basse d'un bœuf standard et d'un bœuf enrichi (Bleu-Blanc-Coeur, 2016)

	Côte d'un bœuf standard	Côte d'un bœuf enrichi
Matières grasses en % dans la viande	5,10%	6,30%
Oméga 3 en g/100g	0,62	1,7
Oméga 6/Oméga 3	7,92	2,2

2.4.2. Le lait de vache

L'analyse des résultats de l'étude INCA 2 indique que les produits laitiers constituent le deuxième groupe d'aliments les plus consommés après les féculents et produits céréaliers. Les Français en consomment presque 30 g/jour (FranceAgrimer, 2016).

Les lipides du lait (3,5 à 6% de la composition totale du lait) sont riches en acides gras saturés ; ils représentent 69% des acides gras totaux. La teneur en acides gras polyinsaturés est très faible avec moins de 4% des AG totaux, dont 2 à 3% de LA et 0,5% d'ALA. Comme la viande de bœuf, la composition lipidique du lait est légèrement sensible à l'alimentation: le printemps et le retour des vaches à l'herbe sont la promesse de beurre et de fromages savoureux, plus moelleux grâce à l'augmentation d'AGPI (Chilliard et al., 2010).

Certaines études ont montré qu'un apport important de graines de lin extrudées à long terme dans la ration alimentaire des vaches diminuait la quantité d'acides gras saturés (AGs). La teneur en AGs dans le lait passait ainsi de 56% des acides gras totaux (AGT), dans un lait non enrichi, à 29% des AGT dans un lait enrichi (Chilliard et al., 2010).

Un enrichissement de 3% de graines de lin extrudées dans la ration alimentaire a été jugé optimal pour améliorer la qualité du lait, sa teneur lipidique, protéique et glucidique (Rouzig, 2013). Une augmentation linéaire de la teneur en ALA du lait a été démontrée avec l'introduction de quantités croissantes de graines de lin extrudées dans l'alimentation des vaches laitières. Mais cette augmentation reste faible : d'après le Tableau 23, le ratio Oméga 6/ Oméga 3 ne diminue que très légèrement.

Tableau 23 : Comparaison des teneurs en matières grasses, en acide gras Oméga 3 et du rapport Oméga 6/ Oméga 3 entre un lait standard et un lait enrichi (Bleu-Blanc-Coeur, 2016)

	Lait standard	Lait enrichi
Matières grasses en % dans le lait	1,61%	2%
Oméga 3 en g/100g	0,64	1,00
Oméga 6/Oméga 3	2,92	2,10

Sur le plan nutritionnel, l'enrichissement de la vache laitière n'est pas très intéressant. Sur le plan environnemental en revanche, il semblerait qu'une alimentation riche en graines de lin extrudées diminuerait la production de gaz à effet de serre produit par les vaches (Brunschwig et al., 2010).

2.4.3. Aspect environnemental et bovins

Le méthane (CH₄) est l'un des principaux gaz à effet de serre, 25 fois plus puissant que le dioxyde de carbone (CO₂). Lors de la digestion des glucides, la vache en produit naturellement au niveau du rumen entre 400 et 600 litres par jour, et le rejette dans l'atmosphère sous forme d'éruclatations et de flatulences. Ces émissions de gaz représentent 5% des émissions des gaz à effet de serre en France. La réduction des émissions de méthane par les ruminants est désormais une préoccupation environnementale de premier plan (Brunschwig et al., 2010).

Les lipides alimentaires apportés aux vaches laitières sont considérés par les scientifiques comme le meilleur moyen de moduler la production entérique de méthane (Hristov et al., 2013). Les acides gras polyinsaturés, et plus précisément l'ALA est capable de limiter la méthanogénèse de manière durable, en inhibant les micro-organismes producteurs de méthane (Martin et al., 2009). Une supplémentation à hauteur de 3,5% en graines de lin extrudées dans la ration alimentaire de l'ensemble des ruminants engendrerait une diminution de 6% des émissions de méthane émis par le bétail (Tableau 24), et une supplémentation de 15% en graines de lin extrudées une diminution de 41% (Doreau et al., 2014).

On a ici un double effet positif des graines de lin dans l'alimentation des ruminants : une légère amélioration de la qualité nutritionnelle du lait et de la viande, et une diminution significative de la production de méthane par les bovins.

Tableau 24 : Diminution de la production de méthane en fonction du pourcentage de graines de lin dans la ration alimentaire des ruminants (Martin et al., 2009)

% graines de lin dans la ration alimentaire des ruminants	Réductions de la production de méthane, en %
3,5%	6%
5%	10%
10%	16%
15%	41%

3. Biodisponibilité des produits obtenus après enrichissement

L'enrichissement des denrées alimentaires permet l'absorption des Oméga 3 avec une matrice alimentaire. Les acides gras Oméga 3 de l'enrichissement ont donc de manière générale une bonne disponibilité puisqu'ils sont mieux absorbés lorsqu'ils sont associés à un repas (Schuchardt and Hahn, 2013).

3.1 Enrichissement direct

L'industrie agroalimentaire a mis au point plusieurs techniques pour augmenter l'absorption des acides gras ajoutés, tout en conservant leurs caractéristiques. L'émulsion par exemple, influe sur la biodisponibilité des acides gras. Il a été démontré que l'hydrolyse des TG est plus importante lorsque les acides gras sont présentés sous forme d'émulsions fines. Cette technique est utilisée pour incorporer des Oméga 3 aux aliments (yaourt, jus de fruit). Les acides gras peuvent aussi être encapsulés pour être incorporés à du lait, par exemple, sans modification de goût du produit original (Vors et al., 2016).

Les produits enrichis contiennent des antioxydants naturels pour empêcher la dégradation des AGPI. C'est le cas de la farine de lin, à laquelle on ajoute du romarin, ou encore des margarines, auxquelles on ajoute de la vitamine E.

3.2 Enrichissement indirect

Lors d'un enrichissement animal, l'augmentation de la teneur en ALA dans les tissus de l'animal se traduit par une augmentation à la fois des formes TG et des formes PL. Dans la viande, la forme triglycéride étant fortement majoritaire, l'ALA est majoritairement véhiculé sous forme de triglycérides. Certaines études admettent que la biodisponibilité des acides gras peut être évaluée par leur capacité à se retrouver dans les lipides plasmatiques ; pour un régime identique, les individus ayant consommé des produits enrichis ont une concentration plasmatique en ALA supérieure aux individus témoins,

une teneur augmentée en EPA et DHA dans les érythrocytes, et un ratio Oméga 6/Oméga 3 diminué (Weill et al., 2002a).

L'enrichissement des poules pondeuses permet d'augmenter à la fois la teneur en ALA mais aussi en EPA et en DHA du jaune de l'œuf. L'ALA est majoritairement porté par les triglycérides, tandis que les acides gras EPA et DHA, sont, exclusivement portés par des phospholipides (PL). Or, comme on l'a dit précédemment, c'est sous cette forme que le DHA le mieux absorbé et inséré aux tissus. Une étude a montré que sous forme de PL, la quantité de DHA ingérée par des rats est retrouvée à hauteur de 90% au niveau du tissu hépatique et à hauteur de 100% au niveau du tissu adipeux, tandis que sous forme éthyl ester, seulement 40% de la quantité ingérée est retrouvée dans le tissu hépatique et 5% est retrouvée dans le tissu adipeux (Tableau 25).

Tableau 25 : Formes d'apport en DHA et accrétion tissulaire chez le rat (Valenzuela et al., 2005)

DHA 8mg/kg 40 jours	Plasma (µg/ml)	Erythrocyte mg/g PL	Tissu hépatique mg/g PL	Tissu adipeux mg/g lipides
Phospholipides	150(+90%)	27,5(+120%)	90(+100%)	90(+100%)
Triacylglycérols	145(+80%)	22,5(+80%)	70(+55%)	7(+55%)
Ethyl ester	150(+90%)	17,5(+40%)	40(-10%)	5(+10%)

Cette particularité de l'œuf enrichi constitue une réelle avancée dans la nutrition, et son développement est en plein essor. Plusieurs études sont actuellement en cours concernant l'évolution nutritionnelle de l'œuf, notamment via l'enrichissement avec des algues marines (Chartrin et al., 2015). L'innocuité de cet enrichissement doit encore être démontrée ; la teneur en iode, par exemple n'a pas été évaluée.

4. Risques de l'enrichissement

L'optimisation des apports en Oméga 3 ne doit pas remettre en cause leur intérêt pour la santé. Les risques liés à leur usage sont donc évalués.

4.1 Risque de surexposition à l'acide α -linoléique

L'enrichissement et la valorisation des produits riches en ALA posent la question du surdosage. L'autorité européenne de sécurité des aliments, l'Efsa (European Food Safety Authority), a rendu un avis : compte tenu du rôle énergétique de l'acide gras ALA et de son métabolisme en autres acides gras, la consommation d'ALA n'est pas considérée comme dangereuse. Il n'y a cependant aucun intérêt à consommer plus de 2g/jour.

4.2 Risque intrinsèque de l'utilisation de la graine de lin

L'intérêt de la graine de lin dans l'enrichissement est sa haute teneur en acide gras Oméga 3. Mais la graine de lin est aussi riche en fibres et en lignanes, qui ne sont pas détruits par le phénomène de thermo-extrusion. Les risques liés à une surconsommation de fibres sont principalement d'ordre digestif (ballonnements, difficulté de digestion, gaz) pour l'homme et l'animal. Mais les risques liés à une exposition à long terme aux phyto-œstrogènes du lin (SDG) ne sont pas encore complètement élucidés. L'impact des phyto-œstrogènes sur la santé humaine est en effet très controversé, notamment sur la fertilité, les caractères sexuels ou encore leur cancérogénéité. On peut aussi se demander dans quelle mesure ces hormones entrent en compétition avec les hormones naturelles chez des individus sains, tout âge confondu. Il serait utile d'analyser la teneur en phyto-œstrogènes des produits enrichis aux graines de lin, de manière directe ou indirecte (Anses, 2011). Toutefois, pour l'enrichissement animal, notons que les animaux sont actuellement nourris en grande partie avec des graines de soja, graines oléo-protéagineuses très riches en phyto-œstrogènes bien plus puissants que ceux du lin !

Des traces de composés cyanogénétiques, la linustatine et la néolinustatine sont aussi retrouvés dans la graine de lin. Ces composés produisent du cyanure d'hydrogène (HCN-) lors de leur hydrolyse, capable d'inhiber le fonctionnement cellulaire en empêchant l'utilisation de l'oxygène par les cellules. Des études ont montré qu'un chauffage à 200°C des graines pendant 2 heures diminuait la concentration de linustatine et de néolinustatine de 85% (Park et al., 2005). La mise en contact avec de l'eau chaude permet aussi de libérer l'acide cyanhydrique et donc de détoxifier les graines. Le procédé de thermo-extrusion, qui cuit la pâte formée par les graines de lin broyées grâce à de la vapeur d'eau est un bon moyen d'éliminer les composés cyanogénétiques de la graine de lin. Aucune dose toxique n'a été relevée chez l'homme (Abraham et al., 2016).

4.3 Risque lié à l'oxydation des acides gras Oméga 3

Les acides gras Oméga 3 étant sensibles à l'oxydation, tous les produits enrichis en AGPI sont susceptibles de s'oxyder. L'oxydation des acides gras se traduit par des altérations nutritionnelles des aliments (perte en vitamines), des altérations qualitatives ainsi que par la production de métabolites secondaires (peroxydes, aldéhydes) potentiellement toxiques. Les modifications organoleptiques qui accompagnent cette oxydation sont considérées comme suffisantes pour décider ou non de la consommation du produit : l'apparition de tâches marrons, d'une odeur nauséabonde et d'une acidité empêchent généralement le consommateur d'ingérer l'aliment !

La toxicité des peroxydes et des aldéhydes est débattue : il existe un système de détoxification au niveau de la barrière intestinale, qui consiste à réduire les composés hydroperoxydes en dérivés hydroxylés, non toxiques, grâce à une enzyme, la glutathion peroxydase (Cillard and Cillard, 2006). On peut aussi noter que l'apport d'acides gras Oméga 6 en grande quantité dans notre alimentation actuelle apporte statistiquement 3 fois plus de doubles liaisons et donc plus de risque d'oxydation et de molécules toxiques que les acides gras Oméga 3 (Guesnet et al., 2005).

Pour limiter cette oxydation, l'ajout de vitamine E lors du traitement industriel des produits enrichis inhibe la dégradation des acides gras Oméga 3. Les industriels doivent assurer la présence et la stabilité de 90% des acides gras utilisés pour l'enrichissement direct des denrées alimentaires. Pour les denrées alimentaires obtenues via l'enrichissement indirect, l'ajout d'antioxydant est aussi de rigueur. Plusieurs études ont montré que l'ajout de vitamine E ou d'antioxydants végétaux (AOV) dans la ration alimentaire des animaux permettait de réduire le risque de peroxydation des acides gras polyinsaturés (AGPI) et ainsi de conserver les qualités gustatives des produits enrichis (Mairesse et al., 2011). Les AOV (souvent des polyphénols) permettent de régénérer l'action de la vitamine E (Gladine et al., 2007). L'introduction des AOV sur une période courte (10 jours avant l'abattage) semble suffisamment efficace pour réduire la peroxydation des AG dans la viande fraîche et dans un produit à séchage court comme le saucisson sec (Mourot et al., 2011). L'oxydation des acides gras est une des raisons majeures de la dégradation des aliments.

4.4 Risque lié aux métabolites secondaires

L'introduction de graines de lin extrudées dans la ration des bovins conduit à la production de métabolites secondaires : on constate une augmentation significative de la formation des isomères de l'acide linoléique conjugué (CLA). Ce sont des acides gras *trans* produits naturellement lors de la bio-hydrogénation ruminale. On les retrouve en grande quantité dans le lait lors d'un enrichissement en graines de lin, mais aussi dans la viande. Aucun seuil de toxicité n'est actuellement proposé pour les CLA en alimentation. Pourtant de nombreux effets ont été rapportés suite à leur consommation ; certaines études montrent qu'ils auraient des effets athérogènes, diabétogènes, inducteurs des marqueurs de l'inflammation et du stress oxydant tandis que d'autres mettent en avant leur capacité à diminuer la masse grasse et à augmenter la masse maigre chez différentes espèces animales (Anses, 2011).

Les CLA font actuellement l'objet de nombreuses études scientifiques ; ils auraient potentiellement des propriétés immunostimulantes et anti-carcinogènes (Chilliard et al., 2010). Les risques liés à une consommation accrue par l'enrichissement de l'alimentation bovine ne sont pas encore connus.

L'acide ruménique, dont la concentration est augmentée dans le sang lors de la consommation de lait enrichi, n'a pas non plus démontré son innocuité.

5. Les limites de l'enrichissement

5.1 Répétition de la qualité nutritionnelle

Les études analysées dans cette partie ne précisent ni la variété, ni la teneur en lipides et en acide α -linoléique des graines de lin. Or il existe une grande variété de graines de lin, avec des teneurs en matière grasse et en acides gras Oméga 3 très différentes. La teneur en ALA peut être multipliée par 25 entre deux variétés (Rousseaux, 2005) ! L'enrichissement peut donc être plus ou moins efficace : utiliser des graines de lin moyennement riches en ALA perdrait en efficacité ! Actuellement, seule l'entreprise Valorex propose des graines de lin extrudées pour l'enrichissement du bétail.

5.2 Performance de l'animal

L'utilisation de la graine de lin extrudée dans l'alimentation des animaux d'élevage n'est possible que si cette pratique augmente ou égale les performances actuelles de l'animal. Le rendement du lait, des œufs, et la qualité de la viande issue d'un enrichissement doivent être aussi performants que ceux des mêmes produits issus de filières standards. L'ajout de 3% à 5% de graines de lin extrudées dans la ration alimentaire a été jugé optimal pour le bien-être de l'animal et pour conserver leurs teneurs en lipides, glucides et protéines tout en modifiant la composition des acides gras. Par exemple, un ajout supérieur à 5% de graines de lin extrudées dans la ration de la vache laitière diminue la digestion des fibres dans le rumen et perturbe ainsi l'équilibre de l'animal (Petit et al., 2008).

Le coût de revient de l'enrichissement pour l'éleveur doit aussi être faible. L'enrichissement de la filière des volailles par exemple est difficilement réalisable sur le plan économique.

5.3 Limite sensorielle

Les tests de saveur de la viande et de la charcuterie penchent en faveur d'un animal à alimentation enrichie; la viande est dite plus goûteuse (Bourre, 2004).

Le lait enrichi, plus sensible à l'oxydation qui peut lui donner un goût rance, a été jugé acceptable par un panel de testeurs.

5.4 Limites nutritionnelles

Améliorer la qualité des acides gras dans l'alimentation animale est une bonne façon d'augmenter ses apports en acides gras de la famille des Oméga 3, pour rééquilibrer le rapport Oméga 6 / Oméga 3. Cependant, les denrées enrichies présentent une teneur en matières grasses plus élevées que leurs homologues standards (excepté le porc). Consommer des produits animaux enrichis revient donc à consommer des produits plus riches en lipides, ce qui est contradictoire avec les mesures de santé publique prises actuellement pour diminuer la consommation de lipides.

5.5 Marketing

Les acides gras Oméga 3 sont victimes de leur succès. La notion qu'un aliment soit riche en Oméga 3 renforce sa bonne image nutritionnelle. Des produits comme le lait, dont la composition en acides gras se modifie peu, et le lapin dont la viande est déjà bien équilibrée, sont tout de même enrichis pour attirer le consommateur !

-La culture du lin, de la luzerne, ou du lupin favorise la rotation des cultures et la biodiversité des sols.

- L'alimentation animale est le premier débouché de la graine de lin en France.

-Les viandes de porc et de volaille sont les viandes les plus consommées. L'enrichissement de ces animaux en graines de lin extrudées augmentent fortement leur teneur en Oméga 3 et rééquilibre le ratio Oméga 6/ Oméga 3.

-Les œufs qui proviennent de poules dont l'alimentation est enrichie sont nutritionnellement très intéressants :

- **Augmentation de la teneur en ALA et rééquilibrage du ratio Oméga 6/ Oméga 3**
- **Augmentation de la teneur en EPA et en DHA, produits à partir de l'ALA chez la poule grâce à son matériel enzymatique**

-L'enrichissement des ruminants en graines de lin extrudées ne modifie que légèrement la teneur en Oméga 3 du lait et de la viande, mais diminue les émissions de gaz à effet de serre du bétail.

-L'introduction de graines de lin dans l'alimentation des ruminants est aujourd'hui la seule méthode reconnue et soutenue par les Nations-Unies, pour réduire la production de méthane du milieu agricole et lutter contre le réchauffement climatique.

La généralisation de l'utilisation des graines de lin en alimentation animale est possible, mais elle nécessite une intensification de la culture de lin en France. Actuellement, la production nationale couvre la moitié des besoins de la nutrition animale, et la culture de lin est moins compétitive que celle d'autres céréales, comme le colza. Le potentiel d'extension des cultures est grand, mais nécessite une coordination de tous les acteurs de la chaîne alimentaire (Doreau and Ferlay, 2015):

-augmentation du nombre de variétés de lin présentes en France.

-avantage financier pour les agriculteurs investis dans une démarche nutritionnelle, écologique et qualité.

-ramassage sélectif du lait et développement de gammes spécifiques pour les produits animaux de la filière lin.

L'association Bleu-Blanc-Cœur est un exemple d'initiative de développement de la filière lin en France.

6. Exemple d'une filière lin en France : l'association Bleu Blanc Cœur

6.1. Présentation

L'association Bleu-Blanc-Cœur (BBC) est une association créée en 2000 dans le Grand-Ouest (Normandie, Bretagne). Elle regroupe des adhérents de toutes catégories : agriculteurs, transformateurs, distributeurs, scientifiques, et consommateurs, tous engagés dans une démarche d'amélioration de la chaîne alimentaire. La filière BBC s'engage à fournir des produits de qualité nutritionnelle supérieure aux filières classiques, en rééquilibrant et en améliorant l'alimentation des animaux. Cette amélioration passe par l'incorporation dans la ration alimentaire des animaux de matières premières riches en acide α -linoléinique, comme l'herbe, les fourrages de luzerne ou de lupin, ou encore la graine de lin extrudée, majoritairement utilisée. Les agriculteurs de l'association BBC (producteurs bovins, lait, œuf) s'engagent à respecter une charte stricte concernant l'alimentation de leur bétail.

Les adhérents producteurs doivent répondre à la fois à des obligations de moyen, et des obligations de résultat :

-Obligations de moyen: les producteurs doivent utiliser des fourrages et des graines sélectionnées pour leur richesse en Oméga 3, et s'assurer de la traçabilité des produits tout au long de la chaîne de production. La graine de lin, économique et riche en ALA est principalement utilisée. Elle est actuellement fournie par l'entreprise Valorex, basée en Bretagne.

-Obligations de résultat: les produits animaux doivent être de qualité, sur le plan nutritionnel (teneur en Oméga 3) et sur le plan gustatif. Chaque produit est analysé tout au long de la chaîne alimentaire pour s'assurer de sa qualité nutritionnelle. Le profil lipidique des animaux est contrôlé, avec des valeurs cibles définies. Globalement, les produits BBC sont plus riches en acides gras ALA, moins riches en AG saturés et possèdent un ratio Oméga 6/ Oméga 3 équilibré, inférieur à 5.

6.2. Une démarche basée sur des études scientifiques

Pour garantir l'efficacité de ses produits et apporter de la crédibilité à sa démarche, l'association BBC a réalisé 5 études cliniques :

6.2.1. 1ère étude clinique

L'objectif de la première étude clinique était de démontrer la pertinence d'un enrichissement animal pour l'homme. L'augmentation du taux d'acide α -linoléinique (ALA) dans la chair et le sang des animaux, après enrichissement avec la graine de lin extrudée avait déjà été démontrée par plusieurs études. Il s'agissait ensuite de montrer que l'ingestion de produits enrichis engendrait des effets bénéfiques pour l'homme. L'étude s'est déroulée sur deux périodes de 35 jours, où 75 patients en bonne santé étaient leur propre témoin, à 18 jours d'intervalle. Les premiers 35 jours, les volontaires

se sont nourris avec des produits non enrichis. Après une pause de 18 jours, ils ont consommé pendant une deuxième période de 35 jours, des produits enrichis. Aucun autre changement alimentaire n'a été effectué. Les volontaires ont montré un taux significativement plus élevé en ALA dans le sang après avoir consommé des produits enrichis versus des produits non enrichis. Les taux en EPA et en DHA ont légèrement augmenté, tandis que le taux en AA a diminué significativement. Cette observation conforte la notion de compétition enzymatique entre l'acide α -linoléinique et l'acide linoléique. Ces modifications contribuent à rétablir le ratio Oméga 6/ Oméga 3 (Weill et al., 2002a).

Cette première étude démontre l'intérêt de consommer des produits enrichis pour une personne en bonne santé.

6.2.2. 2ème étude clinique

L'objectif de la deuxième étude était d'observer les effets d'une consommation de pain enrichi en graines de lin extrudées sur les paramètres lipidiques de volontaires. Trente-deux volontaires ont substitué pendant 28 jours leur pain habituel par du pain expérimental contenant 5% de graines de lin extrudées, sans aucune autre modification de leur régime. Au terme des 28 jours, le taux sanguin en ALA a augmenté de 30% par rapport au taux sanguin réalisé au début de l'expérience. Le taux d'EPA a aussi augmenté de 30% et le rapport Oméga 6/ Oméga 3 a diminué de 14%. Une baisse de la cholestérolémie et de la triglycéridémie a été également observée (Weill et al., 2002b).

L'enrichissement de produits de consommation courante comme le pain avec de faibles quantités de graines de lin extrudées permet une amélioration rapide du profil lipidique des volontaires.

6.2.3. 3ème étude clinique

Cette étude analyse l'effet d'une alimentation enrichie en Oméga 3 sur le diabète : les acides gras Oméga 3 seraient en effet susceptibles de prévenir l'insulino-résistance et d'améliorer la sensibilité à l'insuline dans le diabète de type 2. Pour cette étude clinique, 51 diabétiques sont divisés en 3 groupes, avec une alimentation différente, et sont observés sur 105 jours. Le groupe témoin consomme des produits standards de grande distribution, le groupe A consomme des produits de la filière lin à l'exception des produits laitiers et de la viande de bœuf, et le groupe B consomme des produits de la filière lin incluant les produits laitiers et la viande de bœuf. Le régime alimentaire des groupes A et B contient plus d'ALA que le régime standard, le régime du groupe B contient plus de CLA que les régimes standards et ceux du groupe A. Au terme des 105 jours, on observe une diminution significative de l'insulinémie à jeun et de la résistance à l'insuline pour les groupe A et B par rapport au groupe témoin. La baisse de la résistance à l'insuline est plus importante dans le groupe B, ce qui suggère un effet des acides gras CLA sur l'insulino-résistance. La teneur en CLA dans le sang des volontaires diabétiques du groupe B est en effet plus élevée que dans celle du groupe témoin et dans celle du groupe A (Schmitt et al., 2006).

Les produits enrichis en acide α -linoléinique montrent des résultats encourageants pour la prévention de l'insulino-résistance. Le rôle du CLA ainsi que son innocuité reste encore à démontrer.

6.2.4. 4ème étude clinique

Une plus grande étude, sur 160 volontaires obèses, a étudié l'effet d'une alimentation enrichie sur le maintien des concentrations en acides gras Oméga 3 dans les cellules sanguines, en l'absence de consommation de poisson ou d'autres produits marins. Les 160 volontaires sont séparés en deux groupes, un groupe témoin, soumis à une alimentation standard et un groupe expérimental, soumis à une alimentation enrichie : les produits animaux et le pain ont des teneurs en ALA plus élevées que celles des produits standards. Ces deux groupes consommaient régulièrement du poisson ou des dérivés avant l'étude. Pendant l'étude, cette consommation leur est interdite. Au bout de 90 jours, on observe une augmentation du taux d'ALA dans les cellules sanguines des volontaires du groupe expérimental, par rapport au groupe témoin. Les taux en EPA et en DHA se sont aussi maintenus, alors qu'ils ont significativement chuté dans le groupe témoin.

En l'absence d'autre source en acides gras Oméga 3, la méthode de l'enrichissement direct ou indirect à partir d'ALA permet d'une part de rétablir un ratio Oméga 6/ Oméga 3 inférieur à 5 (groupe témoin : 22,9 versus groupe expérimental 2,3), et d'autre part de conserver les taux en EPA et DHA grâce aux animaux (volailles) capables de synthétiser ces deux acides gras à partir du précurseur ALA (Legrand et al., 2010).

6.2.5. 5ème étude clinique

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'impact des acides gras CLA, augmentés chez les ruminants lors d'une alimentation enrichie en graines de lin extrudées, sur la santé humaine, et en particulier sur les facteurs cardiovasculaires. Pour cela, l'étude a été menée sur 11 volontaires sains pendant 30 jours. Les résultats n'ont pas été significatifs concernant les modifications de HDL, LDL et cholestérol total. L'expérimentation très courte (4 semaines) sur peu de volontaires est une des causes de ce résultat (Chesneau et al., 2010).

Ces études cliniques démontrent qu'une approche qualité au niveau de l'éleveur a des répercussions bénéfiques sur la santé humaine. D'autres études, plus longues et sur un plus grand nombre de volontaires seraient nécessaires pour préciser les effets sur les paramètres cardiovasculaires et glycémiques et pour évaluer les risques potentiels de l'enrichissement (CLA).

Elles confirment toutes l'intérêt de consommer des aliments enrichis en graines de lin extrudées dans le rétablissement d'un rapport Oméga 6/ Oméga 3 inférieur à 5.

6.3. Les produits Bleu-Blanc-Cœur (BBC)

Actuellement, plus de 7000 produits BBC sont proposés aux consommateurs en fonction des régions (Annexe 2). Au-delà de leur intérêt nutritif, c'est aussi leur goût que les consommateurs apprécient. Des analyses de goût ont été réalisées sur les produits transformés BBC, auprès d'un jury formé à l'analyse de goût. Le rôti et la côte de porc BBC sont jugés plus tendres et plus juteux que les produits standards. La viande de porc BBC, obtient le meilleur indice de satisfaction en terme de goût, devant la viande standard, issue de porc nourri d'une ration riche en colza ou en tournesol (Bleu-Blanc-

Cœur, 2016). D'autres analyses, sur la viande de lapin et sur le jambon sec ont montré que les produits BBC sont mieux appréciés que les produits standards.

Ces produits sont retrouvés dans divers systèmes de distribution, des commerçants locaux (boucherie, boulangerie) aux grandes surfaces, en passant par les restaurants et les collectivités. Ils sont disponibles à des prix accessibles pour tous : l'association BBC s'est engagée à garantir un surcoût de 5% maximum pour l'ensemble des filières.

De manière concrète, pour les consommateurs :

-Consommer des produits BBC, en conservant ses habitudes alimentaires revient à un surcoût de 80€/an et permet d'améliorer ses paramètres lipidiques.

-Consommer des produits standards, mais en modifiant ses habitudes alimentaires de manière à suivre les recommandations du Programme National de Nutrition et de Santé (PNNS) revient à économiser 1€/jour, soit 365€/an.

-Consommer des produits BBC en modifiant ses habitudes alimentaires de manière à suivre les recommandations du PNNS revient à économiser 0,90€/jour, soit 328,5€/jour.

À l'heure actuelle, la filière BBC représente un apport dans l'alimentation des Français de 1740 tonnes d'acides gras Oméga 3 supplémentaires, et de 1600 tonnes d'acides gras saturés en moins. La production d'œufs BBC implique l'ajout de 340 tonnes d'EPA et de DHA dans l'alimentation. La démarche BBC est reconnue par les pouvoirs de santé publique, dans le cadre du PNNS. On peut cependant noter qu'une alimentation plus équilibrée, respectant les recommandations du PNNS (manger 5 fruits et légumes par jour, manger du poisson 2 fois/semaine...) apporte suffisamment d'acides gras Oméga 3 et entretient un rapport Oméga 6/Oméga 3 inférieur à 5.

La démarche BBC s'inscrit dans une démarche de qualité nutritionnelle globale. Il ne s'agit pas d'augmenter sa consommation en charcuterie, pour la simple raison qu'elle est plus riche en acides gras Oméga 3 ! Le déséquilibre nutritionnel que connaissent les pays développés est avant tout un excès calorique journalier : on mange trop ! L'information du public, via les professionnels de santé et les messages de santé publique, est primordiale pour introduire la notion de « manger moins mais manger mieux ».

Conclusion

L'utilisation de la graine de lin extrudée via l'enrichissement permet de diversifier l'offre des produits riches en acides gras Oméga 3 destinés à l'alimentation humaine.

L'enrichissement direct est intéressant pour les produits de boulangerie, comme le pain, qui sont consommés régulièrement et peuvent donc avoir un réel impact sur l'apport en acides gras Oméga 3.

L'enrichissement indirect par introduction de la graine de lin dans l'alimentation animale a pour but de modifier, de manière intrinsèque, la qualité nutritionnelle des produits comme les œufs ou la viande de porc. Ces produits animaux sont des aliments de consommation courante qui contribuent de façon importante à augmenter les apports en acides gras Oméga 3 chez l'homme.

La consommation régulière des denrées enrichies permet d'atteindre les seuils journaliers recommandés pour les acides gras Oméga 3 et permet de rééquilibrer le rapport Oméga 6/ Oméga 3. Les aliments enrichis se positionnent en complément des autres sources d'acides gras Oméga 3, et n'ont pas vocation à les concurrencer ni à les remplacer.

Une alimentation équilibrée et diversifiée reste la meilleure manière de s'alimenter. Elle limite le risque de surpoids voire d'obésité, et freine le développement de nombreuses maladies : maladies métaboliques, cardiovasculaires, ou inflammatoires dont le coût, sur le plan humain et économique est important.

Les Français sont de plus en plus conscients de l'importance d'une alimentation de qualité sur leur bon état de santé, grâce aux nombreux messages de santé publique diffusés dans tous les médias.

Le pharmacien, professionnel de santé de proximité, constitue un relai de choix pour diffuser les informations nutritionnelles, faciliter leur compréhension, et conseiller les patients en fonction de telle ou telle situation pathologique.

Il est au cœur des missions de prévention et d'éducation thérapeutique, rôle que les Pouvoirs Publics lui reconnaissent désormais et voudraient voir se développer dans les années à venir.

Bibliographie

Abraham, K., Buhrke, T., and Lampen, A. (2016). Bioavailability of cyanide after consumption of a single meal of foods containing high levels of cyanogenic glycosides: a crossover study in humans. *Arch. Toxicol.* *90*, 559–574.

Adlercreutz, H. (2007). Lignans and human health. *Crit. Rev. Clin. Lab. Sci.* *44*, 483–525.

Albert, B.B., Derraik, J.G., Cameron-Smith, D., Hofman, P.L., Tumanov, S., Villas-Boas, S.G., Garg, M.L., and Cutfield, W.S. (2015). Fish oil supplements in New Zealand are highly oxidised and do not meet label content of n-3 PUFA. *Sci. Rep.* *5*, 7928.

Alessandri, J.-M., Extier, A., Astorg, P., Lavialle, M., Simon, N., and Guesnet, P. (2009). Métabolisme des acides gras oméga-3: différences entre hommes et femmes. *Nutr. Clin. Métabolisme* *23*, 55–66.

Anses (2010). Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à l'actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras.

Anses (2011). Avis de l'Anses relatif à l'évaluation des risques liés aux substances à but nutritionnel ou physiologique dans l'objectif de restreindre ou interdire leur emploi dans les denrées alimentaires | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

Anses (2015). Avis de l'Anses et rapport d'étude. Apports en acides gras de la population vivant en France et comparaison aux apports nutritionnels conseillés définis en 2010.

Avis Afssa (2010). Arrêté du 12 juillet 2010 modifiant l'arrêté du 4 décembre 2008 fixant les conditions d'utilisation de l'huile de lin pour un usage alimentaire (J.O.R.F. 21 juillet 2010).

Ayadi, K., and Ezan, P. (2011). «Pour bien grandir, mange au moins 5 fruits et légumes par jour!»... impact des bandeaux sanitaires sur les pratiques alimentaires des enfants. *Manag. Avenir* 57–75.

Azrad, M., Vollmer, R.T., Madden, J., Dewhirst, M., Polascik, T.J., Snyder, D.C., Ruffin, M.T., Moul, J.W., Brenner, D.E., and Demark-Wahnefried, W. (2013). Flaxseed-derived enterolactone is inversely associated with tumor cell proliferation in men with localized prostate cancer. *J. Med. Food* *16*, 357–360.

Barbarroja, N., López-Pedreira, R., Mayas, M.D., García-Fuentes, E., Garrido-Sánchez, L., Macias-Gonzalez, M., El Bekay, R., Vidal-Puig, A., and Tinahones, F.J. (2010). The obese healthy paradox: is inflammation the answer? *Biochem. J.* *430*, 141–149.

Battagliola, F. (2010). Histoire du travail des femmes (La découverte).

Bedell, S., Nachtigall, M., and Naftolin, F. (2014). The pros and cons of plant estrogens for menopause. *J. Steroid Biochem. Mol. Biol.* *139*, 225–236.

- Belkaid, Y., and Hand, T.W. (2014). Role of the microbiota in immunity and inflammation. *Cell* 157, 121–141.
- Besson, D. (2008). Le repas depuis 45 ans: moins de produits frais, plus de plats préparés. *Insee Prem.* 1208, 1–4.
- Blanpain, N., (France), I. national de la statistique et des études économiques, and Chardon, O. (2010). Projections de population à l'horizon 2060 un tiers de la population âgé de plus de 60 ans.
- Blecker, C., Paquot, M., Wathelet, J.-P., Deleu, M., Sainvitu, P., Nott, K., Richard, G., and Jérôme, C. (2012). Structure, properties and obtention routes of flaxseed lignan secoisolariciresinol, a review. *Base*.
- Bleu-Blanc-Coeur (2016). Bleu-Blanc-Coeur, <http://www.bleu-blanc-coeur.org>, dernière consultation le 21 février 2017.
- Bono, P., Duc, A.L., Lozachmeur, M., and Day, A. (2015). Matériaux : les nouveaux champs de recherche et développement pour la valorisation des fibres végétales techniques (lin fibres et chanvre). *OCL* 22, D613.
- Bourre, J.-M. (2004). Pertinence de l'enrichissement de l'alimentation animale avec des acides gras omega 3 afin d'améliorer pour l'homme la valeur nutritionnelle des produits dérivés. *Médecine Nutr.* 40, 157–170.
- Bouvier, A.-M., and Drouillard, A. (2014). Le point sur l'épidémiologie des cancers du côlon. *Oncologie* 16, 485–490.
- Bruneton, J. (2009). *Pharmacognosie, phytochimie, plantes médicinales* 4e édition (Lavoisier).
- Bruneton, J. (2016). *Pharmacognosie, phytochimie, plantes médicinales* 5e édition (Lavoisier).
- Brunschwig, P., Hurtaud, C., Chilliard, Y., and Glasser, F. (2010). L'apport de lin dans la ration des vaches laitières: Effets sur la production, la composition. *INRA Prod Anim* 23, 307–318.
- Buck, K., Zaineddin, A.K., Vrieling, A., Linseisen, J., and Chang-Claude, J. (2010). Meta-analyses of lignans and enterolignans in relation to breast cancer risk. *Am. J. Clin. Nutr.* 92, 141–153.
- Burdge, G. (2004). α -Linolenic acid metabolism in men and women: nutritional and biological implications. *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care* 7, 137–144.
- Calder, P.C. (2013). Omega-3 polyunsaturated fatty acids and inflammatory processes: nutrition or pharmacology? *Br. J. Clin. Pharmacol.* 75, 645–662.
- Calder, P.C., Albers, R., Antoine, J.-M., Blum, S., Bourdet-Sicard, R., Ferns, G.A., Folkerts, G., Friedmann, P.S., Frost, G.S., Guarner, F., et al. (2009). Inflammatory disease processes and interactions with nutrition. *Br. J. Nutr.* 101, 1–45.

- Calder, P.C., Ahluwalia, N., Brouns, F., Buetler, T., Clement, K., Cunningham, K., Esposito, K., Jönsson, L.S., Kolb, H., Lansink, M., et al. (2011). Dietary factors and low-grade inflammation in relation to overweight and obesity. *Br. J. Nutr.* *106*, S1–S78.
- Calder, P.C., Ahluwalia, N., Albers, R., Bosco, N., Bourdet-Sicard, R., Haller, D., Holgate, S.T., Jönsson, L.S., Latulippe, M.E., Marcos, A., et al. (2013). A consideration of biomarkers to be used for evaluation of inflammation in human nutritional studies. *Br. J. Nutr.* *109*, S1–S34.
- Castetbon, K., Lafay, L., Volatier, J.-L., Escalon, H., Delamaire, C., Chauliac, M., Ledésert, B., and Hercberg, S. (2011). Le Programme National Nutrition Santé (PNNS): bilan des études et résultats observés. *Cah. Nutr. Diététique* *46*, S11–S25.
- Ceppo, F., Jager, J., Berthou, F., Giorgetti-Peraldi, S., Cormont, M., Bost, F., and Tanti, J.-F. (2014). Implication des MAP kinases dans l'inflammation et l'insulino-résistance associées à l'obésité. *Biol. Aujourd'hui* *208*, 97–107.
- Cetisli, N.E., Saruhan, A., and Kivcak, B. (2015). The effects of flaxseed on menopausal symptoms and quality of life. *Holist. Nurs. Pract.* *29*, 151–157.
- Chandon, P., and André, Q. (2015). Les effets du marketing sur les comportements alimentaires. *Cah. Nutr. Diététique* *50*, 6S69–6S74.
- Charrier, F., Magrini, M.-B., Charlier, A., Fares, M., 'hand, Bail, M.L., Messéan, A., and Meynard, J.-M. (2013). Alimentation animale et organisation des filières : une comparaison pois protéagineux-lin oléagineux pour comprendre les facteurs freinant ou favorisant les cultures de diversification. *OCL* *20*, D407.
- Chartrin, P., Baéza, E., Lessire, M., Méteau, K., Chesneau, G., Guillevic, M., Mourot, J., and others (2015). Effect of different dietary sources of n-3 fatty acids on the laying performance and technological, nutritional and sensorial quality of eggs. *Actes 11èmes Journ. Rech. Avic. Palmipèdes À Foie Gras Tours Fr.* 25 26 Mars 2015 1128–1132.
- Chesneau, G., Morio, B., and Chardigny, J.M. (2010). Differential impact of milk fatty acid profiles on cardiovascular risk biomarkers in healthy men and women. *J. EJCN À Disk Used Despatch Date* *4*, 5.
- Chilliard, Y., Bauchart, D., Lessire, M., Schmidely, P., and Mourot, J. (2008). Qualité des produits: modulation par l'alimentation des animaux de la composition en acides gras du lait et de la viande. *Prod. Anim.* *21*, 95–105.
- Chilliard, Y., Glasser, F., Ferlay, A., Bernard, L., Rouel, J., Martin, B., Martin, C., Enjalbert, F., and Schmidely, P. (2010). Que peut-on attendre des pratiques d'élevage pour améliorer la qualité nutritionnelle des matières grasses du lait bovin et caprin ? *Ol. Corps Gras Lipides* *17*, 22–29.
- Cillard, J., and Cillard, P. (2006). Mécanismes de la peroxydation lipidique et des anti-oxydations. *Ol. Corps Gras Lipides* *13*, 24–29.
- Couedelo, L. (2011). Biodisponibilité nutritionnelle de systèmes colloïdaux riches en acides gras polyinsaturés: études in vivo et in vitro. *Bordeaux* *1*.

- Curry, C.A. (2015). Chemoprotective Effects of Flaxseed Lignans Enterodiol and Enterolactone in Non-transformed Colonocytes. Thesis.
- Dantzer, R. (2009). Cytokine, sickness behavior, and depression. *Immunol. Allergy Clin. North Am.* 29, 247–264.
- Darmon, N., and Carlin, G. (2013). Alimentation et inégalités sociales de santé en France. *Cah. Nutr. Diététique* 48, 233–239.
- Davidson, M.H., Johnson, J., Rooney, M.W., Kyle, M.L., and Kling, D.F. (2012). A novel omega-3 free fatty acid formulation has dramatically improved bioavailability during a low-fat diet compared with omega-3-acid ethyl esters: The ECLIPSE (Epanova® compared to Lovaza® in a pharmacokinetic single-dose evaluation) study. *J. Clin. Lipidol.* 6, 573–584.
- Dew, T.P., and Williamson, G. (2013). Controlled flax interventions for the improvement of menopausal symptoms and postmenopausal bone health: a systematic review. *Menopause* 20, 1207–1215.
- Diederichsen, A., and Richards, K. (2003). Cultivated flax and the genus *Linum* L. *Flax Genus Linum* 22–54.
- Doreau, M., and Ferlay, A. (2015). Linseed: a valuable feedstuff for ruminants. *OCL* 22, D611.
- Dugan, M.E., Vahmani, P., Turner, T.D., Mapiye, C., Juárez, M., Prieto, N., Beaulieu, A.D., Zijlstra, R.T., Patience, J.F., and Aalhus, J.L. (2015). Pork as a source of omega-3 (n-3) fatty acids. *J. Clin. Med.* 4, 1999–2011.
- E.C.K, J.-F. (1990). Histoire de l'économie française depuis 1945 (Armand Colin).
- Escalon, H., Bossard, C., Beck, F., and Bachelot-Narquin, R. (2009). Baromètre santé nutrition 2008. INPES St.-Denis.
- FAO (2009). Food and Agriculture Organization of the United Nations_ <http://www.fao.org>, consulté le 07 janvier 2017.
- FAO (2012). Food and Agriculture Organization of the United Nations_ <http://www.fao.org>, consulté le 12 février 2017.
- FAO (2016). La situation mondiale des pêches et de l'aquaculture 2016. Contribuer à la sécurité alimentaire et à la nutrition de tous, <http://www.fao.org>, consulté le 20 novembre 2016.
- Foster, P.A. (2013). Oestrogen and colorectal cancer: mechanisms and controversies. *Int. J. Colorectal Dis.* 6, 737–749.
- FranceAgrimer (2014). Donnée et bilans de consommation de produits carnés en 2014, site <http://www.franceagrimer.fr> consulté le 10 janvier 2017.
- FranceAgrimer (2016a). Oeuf: consommation et ovoproduits, site <http://www.franceagrimer.fr> consulté le 10 janvier 2017.

FranceAgrimer (2016b). La filière lait de vache, site <http://www.franceagrimer.fr> consulté le 10 janvier 2017.

Franco, O.H., Chowdhury, R., Troup, J., Voortman, T., Kunutsor, S., Kavousi, M., Oliver-Williams, C., and Muka, T. (2016). Use of plant-based therapies and menopausal symptoms: A systematic review and meta-analysis. *Jama* 315, 2554–2563.

Gaigner, C., and Hebel, P. (2005). La santé de plus en plus prégnante dans l'alimentation des Français. *Credoc Consomm. Modes Vie*.

Ghasemifard, S., Turchini, G.M., and Sinclair, A.J. (2014). Omega-3 long chain fatty acid "bioavailability": a review of evidence and methodological considerations. *Prog. Lipid Res.* 56, 92–108.

Giraud-Héraud, E., Fontes, M.A., and Pinto, A.S. (2014). Crise sanitaires de l'alimentation et analyses comportementales.

Gomides, A.F. de F., Gonçalves, R.V., de Paula, S.O., Ferreira, C.L. de L.F., Comastri, D.S., and Peluzio, M. do C.G. (2015). Defatted flaxseed meal prevents the appearance of aberrant crypt foci in the colon of mice increasing the gene expression of p53. *Nutr. Hosp.* 31, 1675–1681.

Greenwald, P., Clifford, C.K., and Milner, J.A. (2001). Diet and cancer prevention. *Eur. J. Cancer* 37, 948–965.

Griffon, M. (2013). Qu'est-ce que l'agriculture écologiquement intensive? (QUAE).

Guesnet, P., Alessandri, J.-M., Astorg, P., Pifferi, F., and Lavialle, M. (2005). Les rôles physiologiques majeurs exercés par les acides gras polyinsaturés (AGPI). *Ol. Corps Gras Lipides* 12, 333–343.

Guignard, J.-L. (2015). *Abrégé de Botanique* 16^{ème} édition.

Guillevic, M., Le Minous, A., Blochet, J., Damon, M., and Mourot, J. (2007). Effet de rations enrichies en acides gras n-3 ou n-6 chez le porc: impacts sur la qualité nutritionnelle et la qualité sensorielle des produits transformés. *JOURNEES Rech. Porc. EN Fr.* 39, 223.

Guillevic, M., Kouba, M., and Mourot, J. (2009). Effect of a linseed diet on lipid composition, lipid peroxidation and consumer evaluation of French fresh and cooked pork meats. *Meat Sci.* 81, 612–618.

Gurviez, P. (2016). Nutrition et santé: la communication des entreprises auprès des consommateurs. *Cah. Nutr. Diététique* 51, 18–25.

Hallonet, A. (2016). Développement et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de lin: application au renforcement de structures en béton par collage externe. Université de Lyon.

Hansson, G.K. (2005). Inflammation, atherosclerosis, and coronary artery disease. *N. Engl. J. Med.* 352, 1685–1695.

- He, J., Wang, S., Zhou, M., Yu, W., Zhang, Y., and He, X. (2015). Phytoestrogens and risk of prostate cancer: a meta-analysis of observational studies. *World J. Surg. Oncol.* *13*, 231.
- Hebel, P. (2016). Les attentes des consommateurs en matière d'alimentation santé CREDOC 2016.
- Hercberg, S. (2003). Prévention nutritionnelle: le PNNS, de la théorie à la pratique. *Cah. Nutr. Diététique* *38*, 177–180.
- Holmes, C., Cunningham, C., Zotova, E., Culliford, D., and Perry, V.H. (2011). Proinflammatory cytokines, sickness behavior, and Alzheimer disease. *Neurology* *77*, 212–218.
- Hotamisligil, G.S. (2006). Inflammation and metabolic disorders. *Nature* *444*, 860–867.
- Hristov, A.N., Oh, J., Firkins, J.L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Makkar, H.P.S., Adesogan, A.T., Yang, W., Lee, C., et al. (2013). Special topics--Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *J. Anim. Sci.* *91*, 5045–5069.
- Hutchins, A.M., Brown, B.D., Cunnane, S.C., Domitrovich, S.G., Adams, E.R., and Bobowiec, C.E. (2013). Daily flaxseed consumption improves glycemic control in obese men and women with pre-diabetes: a randomized study. *Nutr. Res.* *33*, 367–375.
- Imran, M., Ahmad, N., Anjum, F.M., Khan, M.K., Mushtaq, Z., Nadeem, M., and Hussain, S. (2015). Potential protective properties of flax lignan secoisolariciresinol diglucoside. *Nutr. J.* *14*, 71.
- INCA 2 (2006). Données de consommations et habitudes alimentaires de l'étude INCA 2.
- Innis, S.M. (2014). Omega-3 fatty acid biochemistry: perspectives from human nutrition. *Mil. Med.* *179*, 82–87.
- INSEE (2000). Comptes nationaux annuels en 2000–Les comptes de la Nation en 2000 | Insee.
- Jackowski, S.A., Alvi, A.Z., Mirajkar, A., Imani, Z., Gamalevych, Y., Shaikh, N.A., and Jackowski, G. (2015). Oxidation levels of North American over-the-counter n-3 (omega-3) supplements and the influence of supplement formulation and delivery form on evaluating oxidative safety. *J. Nutr. Sci.* *4*, e30.
- Joffre, C., and Layé, S. (2016). Nutrition, inflammation and depression. *Corresp. EN Metab. Horm. DIABETES Nutr.* *20*, 138–141.
- Johnsen, N.F., Olsen, A., Thomsen, B.L.R., Christensen, J., Egeberg, R., Bach Knudsen, K.E., Loft, S., Overvad, K., and Tjønneland, A. (2010). Plasma enterolactone and risk of colon and rectal cancer in a case-cohort study of Danish men and women. *Cancer Causes Control CCC* *21*, 153–162.
- Jusot, F. (2016). L'évolution favorable de l'espérance de vie correspond-elle à une augmentation du bien-être lié à la santé? *Médecine/sciences* *32*, 231–232.

- Kang, J.X. (2004). The Importance of Omega-6/Omega-3 Fatty Acid Ratio in Cell Function. In *Omega-6/Omega-3 Essential Fatty Acid Ratio: The Scientific Evidence*, (Karger Publishers), pp. 23–36.
- Kiyama, R. (2016). Biological effects induced by estrogenic activity of lignans. *Trends Food Sci. Technol.* *54*, 186–196.
- Konieczka, P., Czauderna, M., and Smulikowska, S. (2017). The enrichment of chicken meat with omega-3 fatty acids by dietary fish oil or its mixture with rapeseed or flaxseed. Effect of feeding duration: Dietary fish oil, flaxseed, and rapeseed and n-3 enriched broiler meat. *Anim. Feed Sci. Technol.* *223*, 42–52.
- Koulikoff, F. (2014). Athérosclérose_ <http://www.inserm.fr/thematiques/physiopathologie-metabolisme-nutrition>, consulté le 28 janvier 2017.
- Labalette, F., and Legros, S. (2013). Forces et faiblesses de l'amélioration variétale d'espèces oléagineuses de diversification, l'exemple pour la France du soja, du lin et du chanvre. *OCL* *20*, D404.
- Labalette, F., Landé, N., Wagner, D., Roux-Duparque, M., and Saillet, E. (2011). La filière lin oléagineux française : panorama et perspectives. *Ol. Corps Gras Lipides* *18*, 113–122.
- Lainé, E., Hano, C., and Lamblin, F. (2007). Les lignanes phytoestrogènes du lin sont-ils des bienfaiteurs méconnus? *Phytothérapie* *5*, 121–128.
- Laisney, C. (2011). L'évolution de l'alimentation en France-Panorama des tendances lourdes. *Médecine Nutr.* *47*, 4–13.
- Laissouf, A., Soulimane, N.A.M., and Merzouk, H. (2014). L'effet thérapeutique de l'huile de lin «*linum usitatissimum*» sur l'hypertriglycéridémie et l'hypercholestérolémie chez des rats obèses âgés. *Afr. Sci. Rev. Int. Sci. Technol.* *10*.
- Lamblin, F., Hano, C., Fliniaux, O., Mesnard, F., Fliniaux, M.-A., and Lainé, É. (2008). Intérêt des lignanes dans la prévention et le traitement de cancers. *Médecine/sciences* *24*, 511–520.
- Laporte, M.-E., Michel, G., and Rieunier, S. (2015). Mieux comprendre les comportements alimentaires grâce au concept de perception du risque nutritionnel. *Rech. Appl. En Mark.* *30*, 81–117.
- Legrand, P. (2015). *Coup de pied dans le plat*, Edition Marabout.
- Legrand, P., Schmitt, B., Mourot, J., Catheline, D., Chesneau, G., Mireaux, M., Kerhoas, N., and Weill, P. (2010). The consumption of food products from linseed-fed animals maintains erythrocyte omega-3 fatty acids in obese humans. *Lipids* *45*, 11–19.
- Li, H., Sun, K., Zhao, R., Hu, J., Hao, Z., Wang, F., Lu, Y., Liu, F., and Zhang, Y. (2017). Inflammatory biomarkers of coronary heart disease. *Front. Biosci. Landmark Ed.* *22*, 504–515.

- Li, M.-X., Zhu, H.-Y., Yang, D.-H., Ma, X.-Q., Wang, C.-Z., Cai, S.-Q., Liu, G.-R., Ku, B.-S., and Liu, S.-L. (2012). Production of secoisolariciresinol from defatted flaxseed by bacterial biotransformation. *J. Appl. Microbiol.* *113*, 1352–1361.
- Mairesse, G., Benet, M., Méteau, K., Juin, H., Durand, D., and Mourot, J. (2011). Effect of plant antioxidant in n-3 polyunsaturated fatty acid–enriched diet on fatty acid composition and sensorial attributes of dry-cured ham. *Int. J. Food Sci. Technol.* *46*, 2656–2662.
- Marpalle, P., Sonawane, S.K., and Arya, S.S. (2014). Effect of flaxseed flour addition on physicochemical and sensory properties of functional bread. *LWT-Food Sci. Technol.* *58*, 614–619.
- Martin, C., Ferlay, A., Chilliard, Y., and Doreau, M. (2009). Decrease in methane emissions in dairy cows with increase in dietary linseed content. In *Proceedings of the British Society of Animal Science*, p. 21.
- Mathé, T., and Hébel, P. (2014). *Évolution des représentations sociales du bien manger (Credoc)*.
- Maulucci, G., Cohen, O., Daniel, B., Sansone, A., Petropoulou, P.I., Filou, S., Spyridonidis, A., Pani, G., De Spirito, M., Chatgililoglu, C., et al. (2016). Fatty acid-related modulations of membrane fluidity in cells: detection and implications. *Free Radic. Res.* *50*, S40–S50.
- Médale, F. (2010). Pratiques d'élevage et qualité nutritionnelle des lipides des poissons. *Cah. Nutr. Diététique* *45*, 267–273.
- Minihane, A.M., Vinoy, S., Russell, W.R., Baka, A., Roche, H.M., Tuohy, K.M., Teeling, J.L., Blaak, E.E., Fenech, M., Vauzour, D., et al. (2015). Low-grade inflammation, diet composition and health: current research evidence and its translation. *Br. J. Nutr.* *114*, 999–1012.
- Monnet, J. (2010). *Manger sur le pouce dans la métropole contemporaine: dispositifs de consommation ambulante et "snackisation" du paysage urbain (Editions universitaires de Dijon)*.
- Morin, O. (2015). Caractéristiques des huiles de lin et de chanvre. *Oilseeds Fats Crops Lipids* *22*.
- Mourot, J. (2010). Que peut-on attendre des pratiques d'élevage pour la viande de porcs et autres monogastriques ? *Ol. Corps Gras Lipides* *17*, 37–42.
- Nakamura, M.T., Yudell, B.E., and Loor, J.J. (2014). Regulation of energy metabolism by long-chain fatty acids. *Prog. Lipid Res.* *53*, 124–144.
- Nguyen, A.V. (2015). *Matériaux composites à renfort végétal pour l'amélioration des performances de systèmes robotiques. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II*.
- Nichterlein, K. (2003). Anther culture of linseed (*Linum usitatissimum* L.). In *Doubled Haploid Production in Crop Plants*, (Springer), pp. 249–254.

- Niv, Y. (2015). Estrogen receptor β expression and colorectal cancer: a systematic review and meta-analysis. *Eur. J. Gastroenterol. Hepatol.* 27, 1438–1442.
- Onidol (2009). L'avenir de la filière du lin oléagineux Français, interprofession des oléagineux.
- Park, E.-R., Hong, J.-H., Lee, D.-H., Han, S.-B., Lee, K.-B., Park, J.-S., Chung, H.-W., Hong, K.-H., and Kim, M.-C. (2005). Analysis and decrease of cyanogenic glucosides in flaxseed. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 34, 875–879.
- Parra, D., Ramel, A., Bandarra, N., Kiely, M., Martínez, J.A., and Thorsdottir, I. (2008). A diet rich in long chain omega-3 fatty acids modulates satiety in overweight and obese volunteers during weight loss. *Appetite* 51, 676–680.
- Petit, H.V., Cavalieri, F.B., Santos, G.T.D., Morgan, J., and Sharpe, P. (2008). Quality of embryos produced from dairy cows fed whole flaxseed and the success of embryo transfer. *J. Dairy Sci.* 91, 1786–1790.
- Ph Européenne (2013). Pharmacopée Européenne 8.0 - Graine de lin.
- Planetoscope Statistiques : Consommation mondiale de viande, site <http://www.planetoscope.com/elevage-viande> consulté le 12 novembre 2016.
- Power, S.E., O'Toole, P.W., Stanton, C., Ross, R.P., and Fitzgerald, G.F. (2014). Intestinal microbiota, diet and health. *Br. J. Nutr.* 111, 387–402.
- Pruthi, S., Qin, R., Terstreip, S.A., Liu, H., Loprinzi, C.L., Shah, T.R.C., Tucker, K.F., Dakhil, S.R., Bury, M.J., Carolla, R.L., et al. (2012). A phase III, randomized, placebo-controlled, double-blind trial of flaxseed for the treatment of hot flashes: North Central Cancer Treatment Group N08C7. *Menopause N. Y. N* 19, 48–53.
- Rajohanesa, N., Ezan, P., and Brée, J. (2009). Pour votre santé, mangez au moins cinq fruits et légumes par jour «www.mangerbouger.fr». Les bandeaux sanitaires ont-ils modifié les comportements alimentaires? Etude comparative mère/enfant». *Actes 14èmes Journ. Rech. En Mark. Bourgogne* 12–13.
- Ramallal, R., Toledo, E., Martínez-González, M.A., Hernández-Hernández, A., García-Arellano, A., Shivappa, N., Hébert, J.R., and Ruiz-Canela, M. (2015). Dietary Inflammatory Index and Incidence of Cardiovascular Disease in the SUN Cohort. *PLOS ONE* 10, e0135221.
- Rapaport, M.H., Nierenberg, A.A., Schettler, P.J., Kinkead, B., Cardoos, A., Walker, R., and Mischoulon, D. (2016). Inflammation as a predictive biomarker for response to omega-3 fatty acids in major depressive disorder: a proof-of-concept study. *Mol. Psychiatry* 21, 71–79.
- Raynal-Ljutovac, K., Bouvier, J., Gayet, C., Simon, N., Joffre, F., Fine, F., Vendeuvre, J.-L., Lopez, C., Chardigny, J.-M., Michalski, M.-C., et al. (2011). Organisation structurale et moléculaire des lipides dans les aliments: impacts possibles sur leur digestion et leur assimilation par l'Homme. *Ol. Corps Gras Lipides* 18, 324–351.

Rebouissou, S., Amessou, M., Couchy, G., Poussin, K., Imbeaud, S., Pilati, C., Izard, T., Balabaud, C., Bioulac-Sage, P., and Zucman-Rossi, J. (2009). Frequent in-frame somatic deletions activate gp130 in inflammatory hepatocellular tumours. *Nature* 457, 200–204.

Règlement (CE) n°116/2010 (2010). Union Européenne Règlement (CE) n°116/2010 de la commission, modifiant le Règlement Union Européenne n°1924/2006.

Règlement (CE) n°432/2012 (2012). Règlement (CE) n°432/2012.

Règlement (CE) n°1924/2006 (2006). Union Européenne Règlement (CE) n°1924/2006, du Parlement Européen et du Conseil du 20 décembre 2006 concernant les allégations nutritionnelles et de santé portant sur les denrées alimentaires. JOUE.

Repères PNNS, A. (2016). Actualisation des repères du PNNS: révision des repères de consommations alimentaires.

Rousseaux, E. (2005). *Le lin et ses secrets*. Geste Ed. Crèche Fr. 56p.

Rouzic, J.L. (2013). *Le lait : une source d'acides gras d'intérêt nutritionnel dans l'alimentation humaine*.

Saillard, M. (2012). Règlementation relative à l'étiquetage et aux allégations des produits alimentaires en général, et des huiles et matières grasses en particulier. *Ol. Corps Gras Lipides* 19, 76–82.

Savage, G.P., Dutta, P.C., and McNeil, D.L. (1999). Fatty acid and tocopherol contents and oxidative stability of walnut oils. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 76, 1059–1063.

Schmitt, B., Ferry, C., Daniel, N., Weill, P., Kerhoas, N., and Legrand, P. (2006). Effet d'un régime riche en acides gras Omega3 et en CLA 9-cis, 11-trans sur l'insulinorésistance et les paramètres du diabète de type 2. *Ol. Corps Gras Lipides* 13, 70–75.

Schuchardt, J.P., and Hahn, A. (2013). Bioavailability of long-chain omega-3 fatty acids. *Prostaglandins Leukot. Essent. Fat. Acids PLEFA* 89, 1–8.

Seibold, P., Vrieling, A., Johnson, T.S., Buck, K., Behrens, S., Kaaks, R., Linseisen, J., Obi, N., Heinz, J., Flesch-Janys, D., et al. (2014). Enterolactone concentrations and prognosis after postmenopausal breast cancer: assessment of effect modification and meta-analysis. *Int. J. Cancer* 135, 923–933.

Shim, Y.Y., Gui, B., Wang, Y., and Reaney, M.J.T. (2015). Flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil processing and selected products. *Trends Food Sci. Technol.* 43, 162–177.

Simopoulos, A.P. (2016). Evolutionary Aspects of the Dietary Omega-6/Omega-3 Fatty Acid Ratio: Medical Implications. In *Evolutionary Thinking in Medicine*, (Springer), pp. 119–134.

Singh, K.K., Mridula, D., Rehal, J., and Barnwal, P. (2011). Flaxseed: a potential source of food, feed and fiber. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 51, 210–222.

Smedt-Peyrusse, D., Sargueil, F., Moranis, A., Harizi, H., Mongrand, S., Layé, S., and others (2008). Docosahexaenoic acid prevents lipopolysaccharide-induced cytokine production

in microglial cells by inhibiting lipopolysaccharide receptor presentation but not its membrane subdomain localization. *J. Neurochem.* *105*, 296–307.

Table Ciqual (2016). Anses Table Ciqual 2016 Composition nutritionnelle des aliments_ <https://pro.anses.fr/tableciqual/>.

Tavoularis, G., Recours, F., and Hébel, P. (2007). Perception de la qualité et des signes officiels de qualité dans le secteur alimentaire (CRÉDOC).

Teillet, B., Colin, M., and Prigent, A.Y. (2013). Influence du taux d'acide alpha-linolénique de l'aliment sur la teneur en oméga-3 et les caractéristiques hédoniques de la viande de lapin. *Revue bibliographique. Ol. Corps Gras Lipides* *20*, 55–60.

Thompson, L.U., Boucher, B.A., Liu, Z., Cotterchio, M., and Kreiger, N. (2006). Phytoestrogen Content of Foods Consumed in Canada, Including Isoflavones, Lignans, and Coumestan. *Nutr. Cancer* *54*, 184–201.

Touré, A., and Xueming, X. (2010). Flaxseed Lignans: Source, Biosynthesis, Metabolism, Antioxidant Activity, Bio-Active Components, and Health Benefits. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* *9*, 261–269.

Tressou, J., Pasteau, S., Dartinet, S.D., Simon, N., and Le Guillou, C. (2016). Données récentes sur les apports en acides gras des Français. *Cah. Nutr. Diététique* *51*, 232–237.

Turner, T.D., Mapiye, C., Aalhus, J.L., Beaulieu, A.D., Patience, J.F., Zijlstra, R.T., and Dugan, M.E.R. (2014). Flaxseed fed pork: n-3 fatty acid enrichment and contribution to dietary recommendations. *Meat Sci.* *96*, 541–547.

Valenzuela, A., Nieto, S., Sanhueza, J., Nuñez, M.J., and Ferrer, C. (2005). Tissue accretion and milk content of docosahexaenoic acid in female rats after supplementation with different docosahexaenoic acid sources. *Ann. Nutr. Metab.* *49*, 325–332.

Valorex (2015). Valorex rend le lin digeste, site <http://www.valorex.com> consulté le 10 février 2017.

Vors, C., Lecomte, M., and Michalski, M.-C. (2016). Impact de la structure émulsionnée des lipides sur le devenir métabolique des acides gras alimentaires. *Cah. Nutr. Diététique* *51*, 238–247.

Wang, L., Manson, J.E., Rautiainen, S., Gaziano, J.M., Buring, J.E., Tsai, M.Y., and Sesso, H.D. (2016). A prospective study of erythrocyte polyunsaturated fatty acid, weight gain, and risk of becoming overweight or obese in middle-aged and older women. *Eur. J. Nutr.* *55*, 687–697.

Weill, P., and Mairesse, G. (2010). Le lin, son huile, sa graine... et notre santé. *Phytothérapie* *8*, 84–88.

Weill, P., Schmitt, B., Chesneau, G., Daniel, N., Safraou, F., and Legrand, P. (2002a). Effects of introducing linseed in livestock diet on blood fatty acid composition of consumers of animal products. *Ann. Nutr. Metab.* *46*, 182–191.

Weill, P., Schmitt, B., Chesneau, G., Daniel, N., and Legrand, P. (2002b). Introduction de graines de lin cuites dans du pain. Effets sur les paramètres lipidiques sanguins de consommateurs réguliers de pain. *Nutr. Clin. Métabolisme* 16, 16–16.

Xu, H., Barnes, G.T., Yang, Q., Tan, G., Yang, D., Chou, C.J., Sole, J., Nichols, A., Ross, J.S., Tartaglia, L.A., et al. (2003). Chronic inflammation in fat plays a crucial role in the development of obesity-related insulin resistance. *J. Clin. Invest.* 112, 1821–1830.

Yang, L.Y., Kuksis, A., and Myher, J.J. (1990). Lipolysis of menhaden oil triacylglycerols and the corresponding fatty acid alkyl esters by pancreatic lipase in vitro: a reexamination. *J. Lipid Res.* 31, 137–147.

Yi, H., Hwang, K.T., Regenstein, J.M., and Shin, S.W. (2014). Fatty acid composition and sensory characteristics of eggs obtained from hens fed flaxseed oil, dried whitebait and/or fructo-oligosaccharide. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 27, 1026.

Zamora-Ros, R., Ferrari, P., González, C.A., Tjønneland, A., Olsen, A., Bredsdorff, L., Overvad, K., Touillaud, M., Perquier, F., Fagherazzi, G., et al. (2013). Dietary flavonoid and lignan intake and breast cancer risk according to menopause and hormone receptor status in the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition (EPIC) Study. *Breast Cancer Res. Treat.* 139, 163–176.

Annexes

Annexe 1: Avis de AFSSA fixant les conditions d'utilisation de l'huile de lin pour un usage alimentaire

Annexe 2: Liste des produits Bleu-Blanc-Coeur dans le Grand-Ouest, par réseau de distribution

Afssa – Saisine n° 2010-SA-0109**Saisine(s) liée(s) n° 2008-SA-0392**

Maisons-Alfort, le 25 mai 2010

AVIS

**de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments
relatif à une demande d'avis sur un projet d'arrêté modifiant l'arrêté du
4 décembre 2008 fixant les conditions d'utilisation de l'huile de lin pour un
usage alimentaire**

1. RAPPEL DE LA SAISINE

L'Agence française de sécurité sanitaire des aliments (Afssa) a été saisie le mardi 13 avril 2010 par la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes d'une demande d'avis sur un projet d'arrêté modifiant l'arrêté du 4 décembre 2008 fixant les conditions d'utilisation de l'huile de lin pour un usage alimentaire.

2. CONTEXTE

L'arrêté du 4 décembre 2008 fixe les conditions d'utilisation de l'huile de lin pour un usage alimentaire. Cet arrêté concernait uniquement l'huile de lin raffinée. Il avait en effet été pris sur la base notamment de l'avis de l'Afssa du 25 juillet 2006 (saisine 2004-SA-0409), où il est indiqué que l'évaluation de la sécurité de l'huile vierge de lin relève du cas par cas.

En décembre 2008, la Dgcrf a saisi l'Afssa au sujet de l'huile de lin vierge. Cette demande était fondée sur le fait que l'article 28 du Traité de l'Union Européenne ne permet pas de conditionner la mise sur le marché d'un produit légalement commercialisé au sein de l'Union européenne, à la réalisation d'une expertise technique. De ce fait, elle demandait à l'Afssa :

- soit d'apporter des arguments scientifiques étayés permettant de justifier l'interdiction de l'huile de lin vierge ;
- soit d'apporter des éléments permettant d'encadrer la mise sur le marché de cette huile.

Le 31 mars 2009, l'Afssa rendait un avis précisant les conditions d'emploi et de conservation de l'huile de lin vierge afin d'encadrer sa mise sur le marché (saisine 2008-SA-0392).

Le projet d'arrêté faisant l'objet de cette saisine modifie l'arrêté du 4 décembre 2008 et intègre les conditions de mise sur le marché de l'huile de lin vierge.

3. METHODE D'EXPERTISE

Une expertise interne du dossier a été réalisée par l'unité d'évaluation sur la nutrition et les risques nutritionnels, sur la base des avis rendus précédemment par l'Afssa sur le sujet et après consultation des experts du CES « Nutrition Humaine » compétents sur le sujet.

4. ARGUMENTAIRE

En ce qui concerne les aspects relatifs à la teneur maximale en acide alpha-linolénique

L'article 1 ajoute des dispositions concernant l'huile de lin vierge, l'article 2 reste inchangé. Ils indiquent :

Article 1 : « L'huile de lin raffinée est autorisée comme ingrédient en mélange dans les huiles alimentaires et les matières grasses tartinables. L'huile de lin vierge est autorisée seule ou en mélange dans les huiles alimentaires. »

Article 2 : « La fraction lipidique des produits mentionnés à l'article 1^{er} ne contient pas plus de 15 % d'acide alpha-linolénique. La quantité d'huile de lin mise en œuvre dans les denrées alimentaires ne doit pas conduire, pour le consommateur, à une ingestion journalière d'acide alpha-linolénique dépassant les deux grammes. »

L'article 2 fait référence à une limite maximale de consommation d'acide alpha-linolénique, évoquée dans l'avis du 25 juillet 2006. Cette limite avait été proposée sur la base d'une incertitude quant à la sécurité d'emploi de quantités d'acide alpha-linolénique ingérées supérieures à 2 g/j, au regard du risque de cancer de la prostate (Astorg 2004). Depuis la publication de cet avis, de nouvelles données ont été publiées et l'ensemble des données a été réévaluée dans le cadre de l'évaluation du risque lié à la consommation de compléments alimentaires à base d'acide alpha-linolénique (Afssa, 2008) et de l'actualisation des apports nutritionnels conseillés (ANC) en acides gras (Afssa, 2010).

Parmi les 12 études les plus solides méthodologiquement (études cas-témoins de plus de 500 cas, études de cohortes basées sur un questionnaire alimentaire et études nichées dans des cohortes, basées sur des biomarqueurs valables pour l'acide α -linoléique), quatre font état d'une augmentation du risque avec l'acide α -linoléique (Chavarro *et al.* 2007; Giovannucci *et al.* 2007; Harvei *et al.* 1997; Hedelin *et al.* 2007), quatre ne mettent pas en évidence d'association (Andersson *et al.* 1996; Koralek *et al.* 2006; Mannisto *et al.* 2003; Wallstrom *et al.* 2007) et quatre montrent une diminution du risque (Bidoli *et al.* 2005; Hodge *et al.* 2004; Park *et al.* 2007; Schuurman *et al.* 1999). Ces divergences peuvent s'expliquer par : 1) la difficulté particulière d'estimer l'apport individuel d'acide α -linoléique (Astorg *et al.* 2007; Dennis *et al.* 2004) ; 2) le fait que les teneurs en acide α -linoléique dans les lipides sanguins sont basses, voire très basses (dans les phospholipides) ; 3) des facteurs de confusion résiduels : apports énergétiques, composition des aliments vecteurs d'acide α -linoléique, notamment leur teneur en acides gras *trans*, etc. ; 4) un biais de détection possible lié à l'association entre des habitudes alimentaires « saines » et le dépistage précoce du cancer de la prostate. Sur ce point important, la seule étude où ce facteur a été complètement pris en compte par le dépistage obligatoire chez tous les sujets (par le dosage du PSA) ne montre pas d'association entre les apports en ALA et le cancer de la prostate (Koralek *et al.* 2006).

Par ailleurs, des études évoquent une absence de modification de la teneur sanguine en PSA suite à une consommation de régimes enrichis en noix ou en graines de lin, apportant environ 5 ou 7,5 g/j d'acide alpha-linolénique, après 6 mois de régime chez des hommes adultes sains (Simon *et al.* 2007) ou après un mois de régime chez les porteurs d'un cancer de la prostate (Demark-Wahnefried *et al.* 2001).

Pour conclure, l'ensemble de ces études ne met pas en évidence de corrélation positive entre le risque de cancer de la prostate et la consommation ou la concentration sanguine en acide alpha-linolénique.

Dans ce contexte, l'Afssa estime qu'il n'y a plus de fondement scientifique à la limite maximale de consommation d'acide alpha-linolénique de 2 g/j et à la restriction à 15 % d'acide alpha-linolénique dans la fraction lipidique des mélanges à base d'huile de lin vierge ou raffinée, telle que figurant dans le projet d'arrêté.

Il est par ailleurs rappelé que l'huile de lin vierge et l'huile de lin raffinée présentent une teneur en acide alpha-linolénique pouvant atteindre plus de 60 %.

Les apports nutritionnels conseillés en acide alpha-linolénique représentent aujourd'hui 1 % de l'apport énergétique (soit 2,2 g/j pour un apport de 2000 kcal) (Afssa, 2010). L'Afssa

rappelle que des apports très supérieurs ne présentent pas d'intérêt nutritionnel et sont de nature à induire un déséquilibre d'apport, voire un déséquilibre métabolique entre les différents acides gras.

En ce qui concerne les aspects relatifs à la teneur en gamma-tocophérols

L'article 3 « La teneur en alpha et gamma-tocophérols des aliments contenant de l'huile de lin raffinée doit être supérieure à 3 mg/g d'acide alpha-linolénique. » n'appelle pas de commentaire particulier de l'Afssa.

En ce qui concerne les aspects relatifs aux conditions d'utilisation et à l'étiquetage

L'article 4 de la proposition d'arrêté indique : « L'huile de lin vierge est présentée dans un conditionnement en matériau opaque d'un volume maximal de 250 mL, ayant subi un inertage à l'azote avant son obturation et ayant une date limite d'utilisation optimale inférieure à 9 mois. »

Cet article reprend précisément les recommandations de l'Afssa (Afssa, 2009) et n'appelle pas de commentaire particulier.

L'article 5 de la proposition d'arrêté indique :

« L'étiquetage de l'huile de lin vierge comporte les mentions suivantes :

- « ne pas utiliser pour la friture » ;
- « conserver à l'abri de la chaleur avant ouverture » ;
- « après ouverture, conserver au réfrigérateur maximum 3 mois » ;

En ce qui concerne le chauffage de l'huile de lin, l'Afssa recommandait, dans son avis du 31 mars 2009, une utilisation exclusivement à froid, dans la mesure où elle ne disposait pas de résultats d'études de stabilité à la cuisson de l'huile de lin vierge. L'avis du 22 juin 2005 relatif au critère de distinction entre les huiles végétales pour assaisonnement et huiles végétales pour friture préconise en effet, une étude du comportement à la chaleur des huiles (*a minima* 6 heures à 180 °C) afin de vérifier leur bonne stabilité à la cuisson (saisine 2004-SA-0412, Afssa, 2005).

Le décret n°2008-184¹ relatif aux graisses et huiles comestibles prévoit que le chauffage ne doit pas conduire à des teneurs maximales en composés polaires supérieures à 25 % et en polymères de triglycérides supérieures à 14 %. Il indique également que l'étiquetage doit préciser les conditions d'utilisation à respecter pour limiter l'apparition de composés chimiques indésirables et garantir après chauffage le respect des teneurs définies et rappelées ci-dessus.

La mention d'étiquetage relative au chauffage de l'huile de lin vierge ou raffinée, seule ou en mélange, doit donc être en adéquation avec les données industrielles disponibles. L'Afssa ne dispose d'aucune donnée lui permettant de se prononcer sur l'adéquation des mentions d'étiquetage proposées pour le chauffage, notamment pour la cuisson à des températures inférieures aux températures de friture.

Par ailleurs, l'Afssa rappelle qu'aucune étude n'a été conduite chez l'enfant de moins de trois ans sur l'intérêt nutritionnel et l'innocuité de la consommation de l'huile de lin (Afssa, 2006, 2009). De ce fait, dans son avis du 31 mars 2009, elle souhaitait une mention d'étiquetage « ne convient pas aux enfants aux moins de trois ans ». En l'absence d'étude de ce type depuis la publication de ce dernier avis, l'Afssa souhaite le maintien de cette mention d'étiquetage.

Les autres mentions d'étiquetage reprennent les recommandations de l'Afssa (Afssa, 2009) et n'appellent pas de commentaire particulier.

L'Afssa estime également que l'ensemble des mentions d'étiquetage doit s'appliquer pour l'huile de lin vierge et raffinée.

5. CONCLUSION

Tels sont les éléments d'analyse que l'Afssa est en mesure de fournir en réponse à la saisine de la DGCCRF concernant une demande d'avis relatif à un projet d'arrêté modifiant l'arrêté du 4 décembre 2008 fixant les conditions d'utilisation de l'huile de lin raffinée ou vierge pour un usage alimentaire.

Le directeur général

Marc MORTUREUX

LA LISTE DES PRODUITS BLEU-BLANC-CŒUR

PAR ZONE GÉOGRAPHIQUE ET PAR RÉSEAU DE DISTRIBUTION

Retrouvez dans ce document la liste des produits Bleu-Blanc-Cœur disponibles en marque : nationale, de distributeur, régionale, de producteur fermier, et sur les régions GRAND OUEST, ~~NORD & EST, SUD OUEST, SUD EST~~ de la France.

Pour plus d'informations, rendez-vous sur le site ouibienmanger.fr où vous trouverez tous les produits Bleu-Blanc-Cœur référencés près de chez vous.

Bonne lecture à tous !



MARQUES NATIONALES

DISPONIBLES EN GRANDES ET MOYENNES SURFACES :



**MARQUES NATIONALES
DISPONIBLES EN GRANDES ET MOYENNES SURFACES :**

Page 2/3



fromage brebis.com



jean-perrin.com



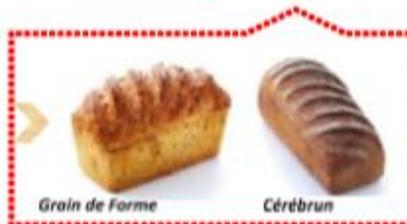
comte-des-suchaux.com



legendesdupatois.fr



**MARQUES NATIONALES
DISPONIBLES EN BOULANGERIES & MAGASINS SPECIALISÉS :**

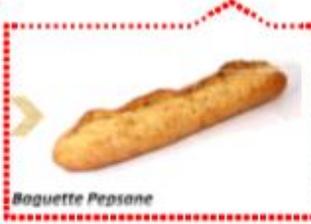


Grain de Forme

Cérébrun



Fleur de Lin



Baquette Pepsane

**MARQUES NATIONALES
DISPONIBLES EN PHARMACIES & COMMERCE EN LIGNE :**

Page 1/3



PHIOBIO



Health prevent

Healthprevent.fr



Linette®

Boutiquelinette.fr



Insudiet

insudiet.fr



CoodFood

Le marché des régions

coodfood.com



**A DECOUVRIR AUSSI, LA GAMME D'ALIMENT BASSE-COUR
POUR VOS ANIMAUX DE COMPAGNIE :**



Magalli
www.magalli.fr



Disponible en jardinerie animalerie **Jardiland**

En magasins **botanic**

Le Jardin, une seconde nature

REVERDY
NUTRITION EQUINE



Disponible en grande surface chez **Carrefour**

MARQUES DE DISTRIBUTEUR
DISPONIBLES EN GRANDES ET MOYENNES SURFACES :



Les nouveaux commerçants



MONOPRIX



thiriet

Les surgelés à ma façon



MATCH

Viande bovine disponible au rayon boucherie traditionnelle (Région Nord)



Intermarché



franprix



DISPONIBLES EN GRANDES ET MOYENNES SURFACES :

<p>LES VIANDES DE LIN</p> <p>Bœuf, porc, veau, agneau, lapin</p>		<p>Le Grand Bœuf</p>	
<p>L'AMITIÉ COSME</p>		<p>FANTOU 1906</p>	
<p>LE LAVANDIER</p>		<p>Bretzh LAPIN</p>	
<p>Dallegrain</p>		<p>LAPIN LE MAGISTRAL</p>	
<p>Agrilait</p>		<p>VOLAILLES GUILLERMOISES</p>	
<p>la Ferme du Manège</p>		<p>Le Père Champain</p>	



DISPONIBLES EN GRANDES ET MOYENNES SURFACES :

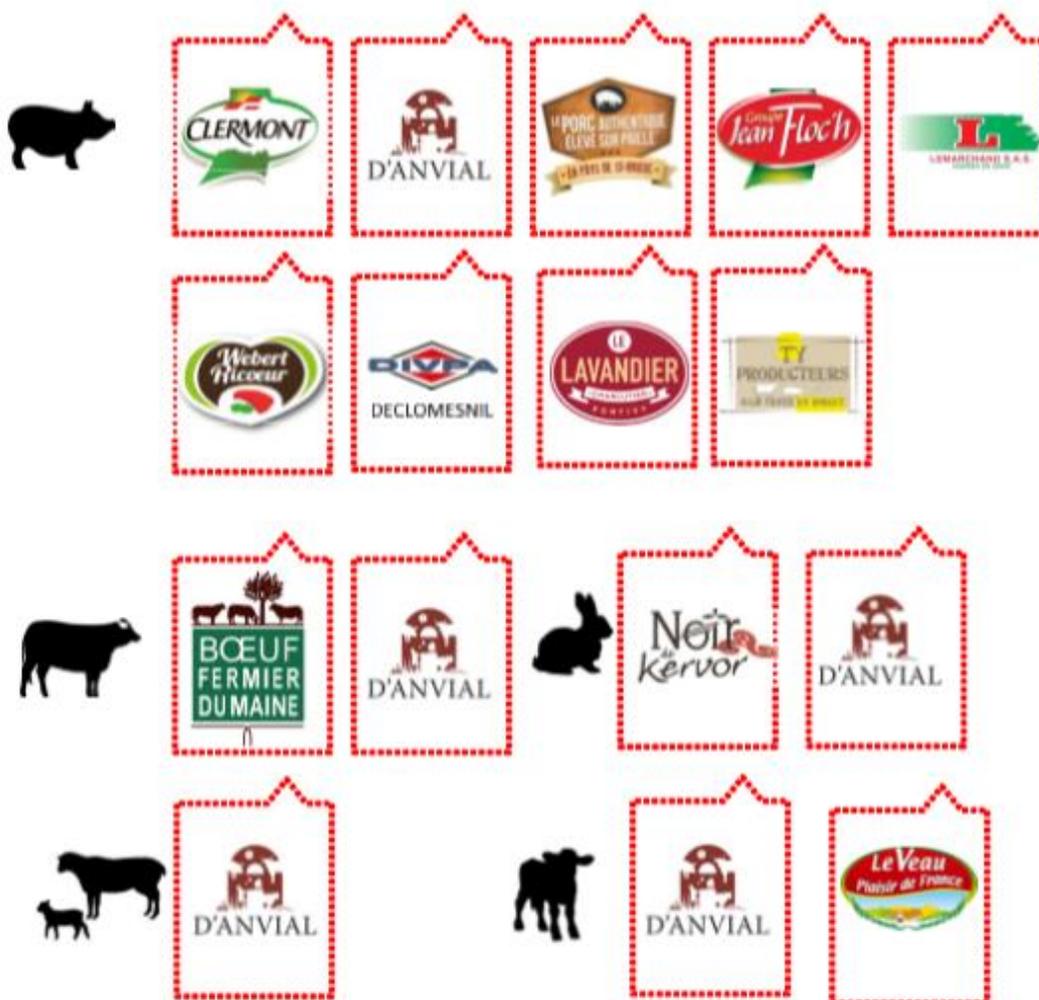
 Marché et Supermarché			
 Farine pour pain et galette			
			

DISPONIBLES EN BOULANGERIES :



DISPONIBLES EN BOUCHERIES – CHARCUTERIES :



DISPONIBLES A LA VENTE A DOMICILE

KERVIANDE

BŒUF • VEAU • PORC • AGNEAU
VOLAILLE • CHARCUTERIE • SURGELÉS

VENTE DIRECTE CHEZ LES PRODUCTEURS FERMIERS :



Bovin :

- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| (27) : MATHIEU CAILLOUEL | (53) : EARL SAINTE ANNE |
| (29) LETTY ROLAND | (53) : PERVIS PATRICK & COLETTE |
| (35) : LA LIMOUSINE DU CHAMP DOLENT | (56) : LE CLERE LA LIMOUSINE DE GOGAL |
| (35) : FERME DE LA PLANCHE | (56) : EARL LA BLANCHE DES PRÈS |
| (35) : EARL MIYABI | (61) : FERME DU FRESNE |
| (44) : GAEC DU MAINE ATLANTIQUE | (72) : SARL LA FERME DU PARC |
| (49) : PERROIS CHRISTIAN | (56) : EARL DANET |



Porc :

- | | | |
|---|---------------------------|-----------------------------|
| (22) : EARL LA MOINERIE | (35) : AUX PETITS COCHONS | (49) : EARL BEAUVAIS |
| (22) : EARL DE LA GRANDE LANDE | (35) : REGIS DESPRES | (49) : FERME DE LANDEFRIÈRE |
| (29) : EARL ANSE DE KEROLLE | (35) : FERME DE LA LANDE | (49) : FERME LE COLOMBIER |
| (29) : LETTY ROLAND | (35) : GAEC JULLIOT | (53) : FERME DES GOUSSIÈRES |
| (35) SCEA DU CHESNOT | (35) : SARL GEORGEAULT | (56) : LE LAVANDIER |
| (35) FERME DU BOSCHET | (44) : SCEA DU HARDOUIN | (56) : SARL TY PRODUCTEURS |
| (72) : EARL DUHAMEL | | |
| (76) : LE COCHON CAMPAGNARD
DU BROMESNIL | | |
| (85) : GAEC DE POUSSIGNY | | |



Lait-yaourt-fromage :

- | | | |
|------------------------------|---|-------------------------------|
| (14) : EARL DE BIEVILLE | (35) : GAEC MÉZIÈRES | (76) : EARL DE LA MARTELLERIE |
| (22) : FERME DE LA RENAUDAIS | (44) : GAEC DE MEZERAC | (76) : GAEC DES FONTAINES |
| (29) : GAEC DE KER AR BELEG | (35) : EARL GIBET | (76) : FERME FONTAINE |
| (29) : FERME DE KERHEU | (37) : ÉLEVAGE CAPRIN DE LA
MERANTAISE | (56) : EARL FROMENTORIAUX |
| (35) : EARL DE VILLE-PRÉTRE | (76) : LA FERME DU MANÈGE | |
| (35) : EARL DU PAS GERAULT | | |



Volaille :

- (35) : REGIS DESPRES
(56) : VOLAILLES GUILLIEROISES
(72) : SARL LA FERME DU PARC
(35) : GAEC PERRIN



Œuf :

- (29) : EARL MOULIN DU CHÂTEL
(44) : FERME DE MOQUESOURIS
(44) : LA MARGAUDERIE



Agneau :

- (22) : LES BERGERS ASSOCIÉS

Magasin fermiers

- (14) : César primeur
(56) : Le Panier Campagnard



Escargot :

- (85) : L'ESCARGOTIERE DE MANON

Boulangeries

- (35) : La Grange à pain (Fougères)
(35) : Saveur gourmande (Vitré)
(44) : Les Hameaux BIO (Trignac)

Vu, le Président du jury,

El-Hassane NAZIH

Vu, le Directeur de thèse,

Delphine CARBONNELLE

Vu, le Directeur de l'UFR,

Virginie FERRE

Nom – Prénoms : DRENO Clémence

Titre de la thèse : **L'enrichissement alimentaire avec la graine de lin : une solution nutritionnelle pour rééquilibrer le rapport Oméga 6/ Oméga 3.**

Résumé de la thèse : Le déséquilibre du rapport Oméga 6/ Oméga 3 a de nombreuses conséquences physiologiques. Longtemps proche de 1/1, ce rapport n'a cessé d'augmenter depuis 40 ans pour atteindre 25/1 dans nos sociétés occidentales. Ce déséquilibre engendre une inflammation de bas grade qui participe à l'émergence des maladies cardiovasculaires, de l'obésité ou encore du diabète. Augmenter ses apports en acides gras Oméga 3 permet de rééquilibrer ce rapport. La graine de lin peut être utilisée à cet effet, grâce à sa teneur élevée en acide α -linoléinique, acide gras de la famille des Oméga 3. L'enrichissement direct avec des graines de lin, ou indirect, par l'introduction de graines de lin dans l'alimentation animale permet de diversifier l'offre des produits riches en acides gras Oméga 3 destinés à l'alimentation humaine et ainsi de rééquilibrer ce rapport Oméga 6/ Oméga 3.

MOTS CLÉS : LIN, DESEQUILIBRE, OMEGA 3, OMEGA 6, ENRICHISSEMENT, NUTRITION

JURY

**PRÉSIDENT : Mr El-Hassane NAZIH, Maître de Conférences de Biochimie,
Faculté de Pharmacie de Nantes**

**ASSESEURS : Mme Delphine CARBONNELLE, Maître de Conférences de
Physiologie
Faculté de Pharmacie de Nantes**

**Mme Véronique HEINE, Docteur en Pharmacie
1 rue du Maréchal Leclerc 53800 RENAZE**

Adresse de l'auteur : 39 rue du Calvaire de Grillaud 44100 NANTES