

Les plantes, sources d'acides gras essentiels oméga 3

Oléagineux, Corps Gras, Lipides. Volume 11, Numéro 2, 106-11, MARS/AVRIL 2004, Sources

Auteur(s) : Eric GONTIER¹, Sébastien GOUGEON¹, Xavier GUILLOT², Brigitte THOMASSET³, Luc MÉJEAN⁴, Thi Lê Minh TRÂN¹, Frédéric BOURGAUD¹

¹ UMR ENSAIA-INRA 1121 Agronomie et Environnement, 2, av. Forêt de Haye, 54500 Vandœuvre, France

<eric.gontier@ensaia.inpl-nancy.fr>

² Laboulet Semences S.A., BP5, 80270 Airaines, France

³ LTE, UMR 6022 CNRS, Université de Technologie de Compiègne, BP 20 529, 60205 Compiègne cedex, France

⁴ LSA-ENSAIA-INRA, 2, av. Forêt de Haye, 54500 Vandœuvre, France

Résumé : L'acide α -linoléique (ALA) fait partie de la famille des acides gras dits oméga 3. Il est dit essentiel parce qu'il ne peut pas être synthétisé dans notre organisme et doit donc être fourni par l'alimentation. Les plantes, sous forme de fruits, de légumes verts, de graines ou d'huiles issues de ces graines constituent une source majeure d'ALA. Cette synthèse a pour but de rappeler l'importance relative des végétaux quant à leur capacité à nous fournir des acides gras essentiels. Elle vise à faire le point sur les différentes voies développées par l'industrie agroalimentaire et à envisager les développements futurs.

Summary : Belonging to omega 3 fatty acid class, α -linolenic acid (ALA) is considered as essential because it can not be synthesised by human organism and must be provided by diet. Plants are important sources of such ALA. From fruits, seeds to green vegetables, this survey will tend to show the relative importance of plant material for providing ALA. Special attention is paid to food-industry progresses and to the potential future developments.

Mots-clés : huiles végétales, acides gras oméga 3, acide linoléique, lin

Keywords : Plant oils, omega 3 fatty acids, linolenic acid, linseed

ARTICLE

Les acides gras polyinsaturés (acides gras essentiels)

Les acides gras polyinsaturés (AGPI) tels que l'AL et l'ALA sont dits « essentiels » car l'homme (comme tous les mammifères) est incapable de les synthétiser à partir des composés présents dans son alimentation, en particulier à partir des acides gras saturés (AGS) ou mono-insaturés (AGMI). Il est donc indispensable que ceux ci soient présents dans la nourriture [1, 2]. On distingue deux classes importantes d'AGPI dont les représentants principaux sont (*figure 1*) :

– les acides gras oméga 6 (aussi appelés n-6) : AL acide linoléique (C18:2, n-6) et AA acide arachidonique (C20:4, n-6) ;

– les acides gras oméga 3 (aussi appelés n-3) : ALA pour acide α -linoléique (C18:3, n-3), EPA pour acide eicosapentaénoïque (C20:5, n-3) et DHA acide docosahexaénoïque (C22:6, n-3). AA, EPA et DHA, possèdent un nombre de carbones strictement supérieur à 18. Ils sont dits « acides gras polyinsaturés longues chaînes » (AGPI-LC). Dans notre organisme, ils peuvent être synthétisés directement à partir de leurs précurseurs à 18 carbones : acide linoléique pour les n6-AGPI-LC et acide linoléique pour les n3-AGPI-LC. Ces AGPI-LC sont présents en quantité importante dans nos cellules, membranes cellulaires et tissus (rétine, cortex cérébral, testicules, spermatozoïdes, cerveau,...). Ils sont aussi des précurseurs de molécules importantes telles que les prostaglandines, les thromboxanes et les leucotriènes [1].

Oméga 3 et santé

Dans l'organisme sain, EPA et DHA peuvent être synthétisés à partir de l'ALA fourni par la nourriture [1, 3, 4]. De même, les n6-AGPI-LC peuvent être synthétisés à partir de l'AL. Cependant, ces deux voies métaboliques conduisant aux n-3 et n-6 AGPI-LC utilisent les mêmes enzymes (élongases et désaturases) et fonctionnent en compétition. Il est donc nécessaire de fournir un bon ratio AL/ALA afin de permettre un bon équilibre métabolique. Le ratio idéal recommandé se situe autour de 5 [2].

De très nombreuses études montrent des effets bénéfiques des acides gras polyinsaturés.

Des enquêtes de consommation ont en effet prouvé que la dose moyenne d'acides gras oméga 3 ingérée au sein de la population française était inférieure aux apports nutritionnels conseillés [2, 4-5]. Par opposition, les doses d'acides gras saturés (acide palmitique, notamment) ou d'oméga 6 sont trop élevées. Un rééquilibrage des besoins en oméga 3, *via* une réduction de la consommation de lipides animaux au profit des huiles végétales est donc nécessaire [1-2]. Une telle alimentation enrichie en ALA peut avoir des conséquences favorables sur la santé humaine. A titre d'exemple, on peut citer les travaux de Renaud *et al.* [6] qui ont mis en évidence une diminution importante des risques de mortalité cardiovasculaire chez des sujets cardiaques, suite à un enrichissement en ALA du régime alimentaire.

Comme indiqué par l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments [2] : « *Un faisceau de travaux expérimentaux et épidémiologiques suggère que la consommation régulière d'acides gras oméga 3 pourrait être associée à des effets cardiovasculaires bénéfiques. Toutefois, différentes études d'intervention, chacune conduite dans des conditions particulières, ont fourni un éclairage quelque peu contrasté* ». Si la tendance montre clairement un avantage apporté par une consommation accrue d'oméga 3, il convient de rester extrêmement prudent quant aux préconisations qui peuvent être faites. C'est le cas, vis-à-vis des allégations éventuelles accompagnant la promotion de produits alimentaires contenant des acides gras oméga 3 [2]. Selon l'étude SU.VI.MAX (citée dans [2]) : « *la contribution des matières grasses végétales (huiles et margarines) à l'apport en ALA est faible – 6, 7 % en moyenne – soit moins que les fruits et légumes (environ 10 %). Toutefois, la contribution des matières grasses végétales à l'apport en ALA s'accroît lorsque l'apport en ALA s'élève* » (figure 2).

En France, les principaux aliments contribuant à l'apport d'ALA sont les produits animaux (produits laitiers, viandes, volailles, charcuteries) qui représentent environ 40 % de l'apport [2]. Cependant, les végétaux (fruits et légumes) et les huiles végétales représentent une possible marge de progrès en vue de s'approcher des apports nutritionnels conseillés pour l'AL et l'ALA dans un rapport AL/ALA proche de 5. C'est ce que nous allons tenter d'illustrer au travers d'un état des lieux et des perspectives envisageables.

ALA dans les légumes verts et les fruits...

On trouve de l'ALA en proportion importante dans des végétaux verts [1, 2, 7-12]. Le chou, le cresson, les épinards, le persil, le pourpier, la laitue, le brocoli, le navet, les haricots, pois ou pois cassés... – et les agrumes – citrons, oranges, pamplemousses... font partie de ces catégories de produits végétaux présentant une teneur relative en ALA élevée (*tableau 1*). Ils sont aussi et surtout intéressants d'un point de vue nutritionnel parce qu'ils apportent d'autres éléments indispensables tels que vitamines, minéraux, antioxydants par exemple [2]. En effet, si l'ALA représente souvent plus de 50 % des acides gras dans les fruits et légumes, la teneur en corps gras est basse [1, 2, 7-12]. Il s'agit surtout des phospholipides et esters de glycérol autres que les triglycérides [13]. Cette teneur est le plus souvent inférieure à 2 g pour 100 g de matière fraîche. Ainsi, la consommation de ces produits apporte une bonne proportion d'ALA mais une quantité totale relativement faible. Il convient donc de privilégier la consommation de fruits et de légumes tout en complétant l'alimentation avec des sources autres à contenu en ALA encore plus important.

Tableau 1. Sources végétales d'acide α -linoléique (beurre et saindoux mis en référence).

Source	Nom anglais	Nom latin	Contenu lipidique (g/100g)	Teneur en ALA : g/100g de produit	Références
Graisses et huiles					
Beurre	Butter		83,2	1,2	1
Saindoux	Lard		100	0,98	1
Huile de lin*	Linseed oil	<i>Linum usitatissimum</i> L.	100	54,2	1
Huile de cameline*	Camelina oil	<i>Camelina sativa</i> (L.) Crtz.	100	30 à 40	7
Huile de soja	Soybean oil	<i>Glycine max</i> (L.)	100	7,7	1
Huile de colza	Rapeseed oil	<i>Brassica napus</i>	100	9	1
Huile de noix	Walnut oil	<i>Juglans regia</i>	100	13,5	1
Huile d'olive	Olive oil	<i>Olea europaea</i>	100	0,86	1

Huile de chanvre*	Hemp oil	<i>Cannabis sativa</i>	100	20	8
Huile de basilic	Basil seed oil	<i>Ocimum basilicum</i>	100	44-65	9
Margarine à base d'huiles végétales	Vegetable oil margarine		80	2,4	1
Noix, amandes, graines...					
Amandes	Almonds	<i>Prunus dulcis</i>	54,1	0,26	1
Noisettes	Hazelnuts	<i>Corylus avellana</i>	61,6	0,15	1
Cacahuètes grillées	Peanuts, roasted	<i>Arachis hypogaea</i> L.	49,4	0,54	1
Noix de pécan	Pecans	<i>Carya illinoensis</i> (Wangenh.) C. Koch	72	0,85	1
Noix	Walnuts	<i>Juglans regia</i>	62,5	6,8	1
Pois du cap	Lima bean, dry	<i>Phaseolus lunatus</i>	1,4	0,25	1
Pois secs	Pea, seed, dry	<i>Pisum sativum</i>	1,44	0,16	1
Graines de soja (sec)	Soybean, dry	<i>Glycine max</i> (L.) Merr.	18,1	0,9	1
Graines de pourpier d'Australie	Purslane	<i>Portulaca oleracea</i> L.	8 à 17	4,8	10
Graines de sésame sauvage	Wild sesame	<i>Perilla frutescens</i> L. var. <i>crispa</i>	27	17,5	11
Germes de blé	Wheat, germ	<i>Triticum</i> sp. L.	9,2	0,59	1
Son de blé	Wheat bran	<i>Triticum</i> sp. L.	4,65	0,16	1
Grain d'orge	Barley whole grain	<i>Avena</i> sp. L.	2,1	0,11	1
Flocons d'avoine	Rolled oats	<i>Avena</i> sp. L.	7	0,1	1

Graine de Matthiole à fruits à trois cornes	Stock	<i>Matthiola tricuspidata</i>	17	7,1	12
Graines de Chia	Chia	<i>Salvia hispanica</i>	25-32	18	12
Légumes et fruits					
Chou fleur	Cauliflower	<i>Brassica oleracea var.botrytis</i>	0,28	0,1	1
Cresson d'eau	Cress	<i>Nasturtium officinale</i>	0,7	0,29	1
Chou frisé	Kale	<i>Brassica oleracea Var. acephala f. sabellica</i>	0,9	0,35	1
Laitue	Lettuce	<i>Eruca lactuca sativa</i>	0,22	0,07	1
Radis	Radishes	<i>Raphanus sativus L.</i>	0,14	0,05	1
Persil	Parsely leaf	<i>Petroselinum crispum</i>	0,36	0,12	1
Pomme de terre	Potato	<i>Solanum tuberosum</i>	0,11	0,02	1
Epinards	Spinach	<i>Spinacia oleracea</i>	0,3	0,13	1
Chou cabus	White cabbage	<i>Brassica oleracea L. convar capitata (L.) Alef. var alba D.C.</i>	0,2	0,09	1
Pourpier d'Australie (feuilles)	Purslane	<i>Portulaca oleracea L.</i>	0,2	0,12	10

* Usage alimentaire interdit (ou très limité) en France. Les informations contenues dans ce tableau ne doivent en aucun cas servir de base unique à l'établissement de quelconques prescriptions alimentaires.

ALA dans des graines et huiles végétales

Les plantes produisent naturellement des acides gras oméga 3 en particulier de l'acide α -linoléique. On le retrouve accumulé dans les triglycérides des graines de certaines espèces telles que colza, soja, ou noix par exemple (*tableau 1*). Les plus grandes quantités sont présentes dans l'huile de lin et de

cameline (*tableau 1*). Ces dernières sont utilisées à des fins non alimentaires dans les domaines des peintures, des encres, des vernis. En effet, la présence de hautes teneurs en acides gras polyinsaturés permet la polymérisation de ces huiles au contact de l'air et/ou sous l'effet de la chaleur et des rayonnements ultraviolets (huiles dites « siccatives »). Cette instabilité à l'air est l'avantage recherché dans les utilisations industrielles non alimentaires. *A contrario*, un usage alimentaire de l'huile de lin (interdit en France à ce jour) peut être envisagé mais il pose cependant un problème. En effet, dès que l'huile est extraite, les phénomènes d'oxydation au contact de l'air ou de polymérisation par la chaleur (sous l'effet thermique des procédés industriels) peuvent engendrer la formation de composés indésirables, voire toxiques pour l'homme [1, 14]. De plus, quand bien même une huile de lin serait produite en conditions suffisamment douces pour permettre le maintien de ses qualités originelles [15], l'utilisateur serait lui-même confronté au risque d'oxydation du produit, une fois la bouteille entamée.

On voit donc que ces huiles siccatives riches en acide linoléique sont intéressantes d'un point de vue nutritionnel pour l'homme mais leur utilisation est limitée à cause de leur instabilité qui peut conduire à l'obtention de composés toxiques [14]. Une solution a été trouvée et semble être assez largement répandue outre-Atlantique où l'huile de lin est vendue comme complément alimentaire [8]. Elle est conditionnée en gélules et de telle sorte que les phénomènes d'oxydation ou les photoréactions radicalaires puissent être évités.

Ainsi, la consommation de gélules d'huile de lin permet de compléter la proportion d'acide oméga 3 (i.e. linoléique) dans une alimentation qui en était en partie carencée. Cette approche semble être intéressante d'un point de vue nutritionnel. Cependant, comme le note E. Siguel en 1996 [8], le nombre de gélules à prendre chaque jour ainsi que le coût de ces dernières rend cette alternative peu réaliste. En outre, il convient de préciser que l'apport journalier recommandé (AJR) se situe autour de 2 g d'ALA par jour. Un excès d'ALA peut conduire à des problèmes de santé majeurs et il convient de ne surtout pas dépasser cette dose [2]. Par ailleurs, une voie alternative visant à trouver de nouveaux débouchés au lin est en développement. Des travaux de sélection ont visé à réduire la teneur en acide linoléique dans des lins non alimentaires. Ces lignées (types solin) présentent des profils en acides gras se rapprochant de ceux de l'huile de tournesol [16, 17]. Une utilisation alimentaire peut dès lors commencer à être envisagée. Cependant les caractéristiques de cette huile font perdre en partie l'avantage de l'huile de lin actuelle (haute teneur en ALA) et diminuent d'autant leur intérêt.

À ce jour, les huiles de colza, de soja ou de noix sont parmi les meilleures huiles végétales alimentaires riches en ALA (*tableau 1*). Pour cette raison, elles doivent être réservées essentiellement aux assaisonnements de salades et ne doivent pas être chauffées. En effet, il est indispensable de rappeler ici qu'une huile riche en ALA mal utilisée (chauffée) ou bien conservée dans de mauvaises conditions peut devenir très néfaste pour la santé humaine [1, 4].

Introduction d'ALA dans la chaîne alimentaire

Les animaux herbivores se nourrissent de plantes naturellement riches en ALA (tout particulièrement l'herbe de printemps). Ils accumulent sous forme native (acide linoléique) ou modifiées (AGPI-LC) ces acides gras dans leurs tissus. Lorsque nous mangeons le lait, les œufs ou la viande de ces animaux, nous consommons des oméga 3 [4].

De nombreuses études ont récemment été menées pour enrichir la ration alimentaire des animaux d'élevage – bovins, porcs, poules pondeuses, chèvres... – en y introduisant une portion quotidienne de graines de lin sous forme extrudées. Ce procédé de cuisson sous pression rend l'huile contenue dans les cellules végétales accessible aux micro-organismes du rumen des bovins. Des premiers tests, réalisés sur des régimes hivernaux de vaches laitières, ont déjà au moins montré des effets bénéfiques sur la fécondité, l'état d'engraissement, ainsi qu'une baisse du taux butyreux au profit de la production de protéines [18].

La société Valorex et ses partenaires dont l'Institut Technique du Lin ou l'Institut de l'Elevage ont ainsi montré que cette pratique permettait d'obtenir des produits finis enrichis – de façon naturelle – en acide α -linoléique mais aussi en acides gras oméga 3 à longues chaînes (les animaux terrestres réalisant la phase d'élongation/désaturation au profit de l'homme). Ces aliments sont disponibles sur le marché et semblent être tout à fait intéressants d'un point de vue nutritionnel et gustatif. Ils permettent d'apporter une dose d'ALA supplémentaire sans pour autant modifier les habitudes alimentaires des consommateurs [19-21]. L'association Bleu-blanc-cœur regroupe les différents partenaires de la filière lin – semenciers, producteurs fermiers, éleveurs, fournisseurs en nutrition animale, transformateurs, distributeurs – qui se sont engagés dans cette voie. Leur objectif est de répondre aux attentes des consommateurs en termes de qualité nutritionnelle, de santé, de sécurité alimentaire et de traçabilité.

Sélection des plantes et approche biotechnologique

Le secteur semencier s'intéresse bien entendu aux acides gras oméga 3. Des travaux visent à tester de nouvelles plantes traditionnellement utilisées, souvent abandonnées ou oubliées et qui présentent de bonnes caractéristiques au niveau des huiles produites ou de la composition nutritionnelle des différentes parties de la plante utilisée comme fruit ou légume [1, 2, 5-7, 9-11, 15-19, 21-25].

Nombreuses sont également les études qui visent à améliorer des plantes déjà naturellement intéressantes en regard de leur capacité à fournir de l'ALA mais présentant des faiblesses - entre autres le programme européen Linochem initié par Laboulet Semences portant sur le profil de l'huile de lin (mucilages, teneur en ALA : recherche@laboulet.fr). De ce point de vue, les méthodes traditionnelles de sélection sont mises en œuvre [7,24] mais les outils des biotechnologies végétales sont aussi utilisés [26]. La culture *in vitro* (sélection précoce sur embryons issus de microspores de colza [27]) et/ou la mutagenèse [7] peuvent permettre d'augmenter la variabilité génétique disponible et ainsi générer des variétés à profil en ALA amélioré. Une autre voie suscite quant à elle un très grand intérêt et se matérialise par de très nombreuses publications [22]. Il s'agit de la voie du génie génétique [28]. En effet, on connaît de mieux en mieux le métabolisme des acides gras (anabolisme) dans les plantes [13, 29-30]. Nombreux sont les gènes qui ont été clonés, séquencés [31-33] et déjà utilisés pour obtenir des plantes à profils en acides gras modifiés [34, 35]. Parmi ces exemples, la production de nouvelles huiles à usage industriel est le plus souvent l'objectif visé [36-40]. Cependant, l'étude et l'utilisation de gènes codant pour des désaturases (enzymes permettant par exemple de désaturer l'acide linoléique en ALA) peut aussi permettre d'obtenir des plantes oléagineuses donnant une huile alimentaire de meilleure qualité en regard de sa composition en ALA (teneur éventuellement augmentée [41, 42] ou le plus souvent diminuée [42]. Si cette voie est

largement étudiée, la question de l'acceptation et de l'acceptabilité des plantes alimentaires génétiquement modifiées reste entièrement posée en Europe et en particulier en France [43, 44].

Conclusion et perspectives

Il ressort clairement de cette synthèse que notre alimentation mérite d'être plus riche en acide α -linoléique. De toutes les voies présentées ci-dessus, il est difficile de prédire laquelle ou lesquelles connaîtront les plus forts développements. De ce point de vue, l'analyse de Sébillotte et Messéan [25, 44] montre la complexité des facteurs mis en jeu ainsi que leurs interrelations. Toutefois, en se replaçant dans le contexte de cette synthèse, on peut dire que les plantes constituent une source d'ALA intéressante et à fort potentiel. Sans chercher ici à préconiser un comportement alimentaire particulier, il est possible d'émettre quelques conseils. Ainsi, on peut affirmer (réaffirmer) qu'une consommation de fruits et légumes frais, peu ou pas cuits semble être une bonne voie. La garniture de plats et salades avec des graines ou cerneaux de noix a le mérite de moduler le goût, de rendre le plat plus agréable à l'œil et d'enrichir l'assiette en ALA. L'utilisation d'herbes aromatiques (persil en particulier), voire de végétaux à usages traditionnels quelque peu abandonnés (pourpier par exemple) est aussi une voie à envisager. Pour les salades, une huile de colza (dite « nouvelle huile de colza ») ou une huile de noix peuvent être employées à bon escient. Attention cependant ! Il conviendra de respecter les indications portées sur les étiquettes des produits (stockage après ouverture) et de ne surtout pas utiliser en friture une huile pour salade. La consommation de produits naturellement riches, voire volontairement enrichis en oméga 3 (margarine végétale, lait, œufs, viande, jambon...), semble judicieuse. Enfin, si l'on s'en réfère aux cuisines crétoises et asiatiques (vietnamienne par exemple riche en soja, basilic, sésame, chou, chou-fleur, cresson, épinards...), on peut penser que l'extrême diversité des plats et de leurs composants est une solution intéressante. La consommation de beaucoup de végétaux (comestibles) peu cuits, agrémentés de fruits de mer, de viandes, de peu de graisses saturées est un régal pour les yeux et le palais. Ce genre de cuisine est certainement aussi, sur bien des plans, un modèle d'équilibre nutritionnel. Cependant, dans les cas où une telle approche privilégiant la diversité des aliments n'est pas envisageable (défaut d'accès aux ressources alimentaires, pathologies diverses, mode de vie...), l'utilisation de compléments alimentaires, voire de plantes génétiquement modifiées peut être une alternative à évaluer. Sur ces derniers points, le débat public est toujours en cours actuellement. N

RÉFÉRENCES

1. TRAUTWEIN EA. N-3 fatty acids – physiological and technical aspects for their use in food. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2001 ; 103 : 45-55.
2. Rapport AFSSA. Rapport sur les acides gras de la famille oméga 3 et système cardiovasculaire : intérêt nutritionnel et allégations, 09/07/2003 : http://www.sante.gouv.fr/htm/pointsur/nutrition/pol_nutri3323a.pdf. Annexes de ce rapport : http://www.afssa.fr/ftp/basedoc/annexes_omega3.pdf
3. BELLEVILLE J. Complémentarité et équilibre de l'apport alimentaire en protéines et en lipides. *OCL* 2003 ; 10, 1 : 31-40.
4. BOURRE JM. Relations entre acides gras oméga 3, oméga 9, structures et fonctions du cerveau. Le point sur les dernières données. Le coût financier alimentaire des oméga 3. *OCL* 2003 ; 10, 3 : 165-74.

5. LEGRAND P, BOURRE JM, DESCOMPS B, *et al.* Lipides. In : *Apports nutritionnels conseillés pour la population française*, AFSSA CNERNA Eds, Tec et Doc Lavoisier, 2001 ; 63-82.
6. RENAUD S, DE LORGERIL M, MAMELLE N, *et al.* Mediterranean alpha-linolenic acid-rich diet in secondary prevention of coronary heart diseases. *The lancet* 1994 ; 343 : 1454-9.
7. BUCHSENSCHUTZ-NORTHDURFT A, SCHUSTER A, FRIEDT W. Breeding for modified fatty acid composition via experimental mutagenesis in *Camelina sativa* (L.) Crtz. *Industrial Crops and Products* 1998 ; 7 : 291-5.
8. SIGUEL E. Issues and problems in the design of foods rich in essential fatty acids. *Lipid Technology* 1996 ; 81-6.
9. HAUMANN BF. Alternative sources for n-3 fatty acids. *INFORM* 1998 ; 9, 12 : 1108-19.
10. LIU L, HOWE P, ZHOU YF, *et al.* Fatty acids and β -carotène in australian purslane (*Portula oleracea*) varieties. *J Chromatogr A* 2000 ; 893 : 207-13.
11. ICHIHARA K, SUDA Y. Lipid biosynthesis in developing perilla seeds. *Phytochemistry* 2003 ; 63 : 139-43.
12. HEUER B, YANIV Z, RAVINA I. Effects of late salinization of chia (*Salvia hispanica*), stock (*Matthiola tricuspidata*) and evening primrose (*Oenothera biennis*) on their oil content and quality. *Industrial Crops and Products* 2002 ; 15 : 163-7.
13. MOREAU P, BESSOULE JJ, MONGRAND S, *et al.* Lipid trafficking in plant cells. *Prog Lipid Res* 1998 ; 37, 6 : 371-91.
14. OVEREEM A, BUISMAN GJH, DERKSEN JTP, *et al.* Seed oils rich in linolenic acid as renewable feedstock for environment-friendly crosslinkers in powder coatings. *Industrial Crop and Products* 1999 ; 10 : 157-65.
15. EVRARD J. Protéines et lipides : des technologies adaptées aux usages actuels et futurs. *OCL* 2003 ; 57-60.
16. FOUILLOUX G. Améliorer le lin oléagineux. *Biofutur* 1995 ;24-6.
17. GREEN AG, DRIBNENKI JCP. Linola- a new premium polyunsaturated oil. *Lipid technology* 1994 ;29-33.
18. WEILL P, SCHMITT B, CHESNEAU G, DANIEL N, SAFRAOU F, LEGRAND P. Effets de l'introduction de lin dans les régimes des animaux sur les paramètres lipidiques des consommateurs de produits d'élevage ; Amélioration de la chaîne alimentaire et prévention des maladies cardio-vasculaires ; Evolution des paramètres lipidiques chez l'homme, secondaire à l'introduction de lin, riche en ALA (n-3), dans l'alimentation d'animaux destinés à la consommation humaine. Dossier Scientifique CERN/INRA/VALOREX, 2000 ; 2002, 17 p.
19. WIESENFELD PW, BABU US, COLLINS TFX, *et al.* Flaxseed increased α -linolenic and eicosapentaenoic acid and decreased arachidonic acid in serum and tissues of rat dams and offspring. *Food and Chemical Toxicology* 2003 ; 41 : 841-55.

20. BABU US, WIESENFELD PW, COLLINS TFX, *et al.* Impact of high flaxseed diet on mitogen-induced proliferation, IL-2 production, cell subsets and fatty acid composition of spleen cells from pregnant and F1 generation Sprague-Dawley rats. *Food and Chemical Toxicology* 2003 ; 41 : 905-15.
21. WOOD JD, RICHARDON RI, NUTE GR, *et al.* Effects of fatty acids on meat quality : a review. *Meat Science* 2003 ; 66 : 21-32.
22. KRIS-ETHERTON PM, ETHERTON TD. The impact of the changing fatty acid profile of fats on diet assesment and health. *J Food Composition and Analysis* 2003 ; 16 : 373-8.
23. PAGES X. De l'huile brute à notre assiette.– Oléoscope (CETIOM), 2000 ; 56 : 21-23.
24. RAHMAN SM, KINOSHITA T, ANAI T, *et al.* Combining ability in loci for high oleic and low linolenic acids in soybean. *Crop Sci* 2001 ; 41 : 26-9.
25. SEBILLOTTE C, MESSEAN A. Foresight on oilseed competitiveness : exploring collectivel the possible “futures”. *OCL* 2003 ; 10, 3 : 191-4.
26. BUDZISZEWSKI GJ, CROFT KPC, HILDEBRAND DF. Uses of biotechnology in modifying plant lipids. *Lipids* 1996 ; 31, 6 : 557-69.
27. MOLLERS C, RUCHER B, STELLING D, *et al.* *In vitro* selection for oleic and linoleic acid content in segregating populations of microspore derived embryos of *Brassica napus*. *Euphytica* 2000 ; 112 : 195-201.
28. BATTEY JF, SCHMID KM, OHLROGGE JB. Genetic engineering for plant oils : potential and limitations. *TIBTECH* 1989 ; 7 : 122-6.
29. POST-BEITTENMILLER D, ROUGHAN G, OHLROGGE JB. Regulation of plant fatty acid biosynthesis. *Plant Physiol* 1992 ; 100 : 923-30.
30. HARWOOD JL. Recent advances in the biosynthesis of plant fatty acids. *Biochimica and Biophysica Acta* 1996 ; 1301 : 7-56.
31. LOPEZ ALONSO D, GARCIA MAROTO F. Plant as “chemical factories” for the production of polyunsaturated fatty acids. *Biotechnology Advances* 2000 ; 18 : 481-97.
32. ARONDEL V, LEMIEUX B, HWANG I, *et al.* Map-based cloning of a gene controlling omega 3 fatty acid desaturation in arabidopsis. *Science* 1992 ; 258 : 1353-5.
33. WHITE JA, BENNING C. Genomic approaches toward the engineering of oil seeds. *Plant Physiol Biochem* 2001 ; 39 : 263-70.
34. HONG H, DATLA N, REED D, *et al.* High-level production of γ -inolenic acid in *Brassica juncea* using a $\Delta 6$ desaturase from *Pythium irregulare*. *Plant Physiology* 2002 ; 129 : 354-62.
35. MURAKAMI Y, TSUYAMA M, KOBAYASHI Y, *et al.* Trienoic fatty acids and plant tolerance to high temperature. *Science* 2000 ; 287 : 476-9.
36. JAWORSKI J, CAHOON EB. Industrial oils from transgenic plants. *Current Opinion in Plant Biology* 2003 ; 6 : 178-84.

- 37.** MURPHY DJ. Engineering oil production in rapeseed and other oil crops. *TIBTECH* 1996 ; 14 : 206-13.
- 38.** MURPHY DJ. Production of novel oils in plants. *Current Opinion in Biotechnology* 1999 ; 10 : 175-80.
- 39.** THELEN JJ, OHLROGGE JB. Metabolic engineering of fatty acid biosynthesis in plants. *Metabolic Engineering* 2002 ; 4 : 12-21.
- 40.** TOPFER R, MARTINI N, SCHELL J. Modification of plant lipid synthesis. *Science* 1995 ; 268 : 681-6.
- 41.** OPSAHL-FERSTAD HG, RUDI H, RUYTER B, *et al.* Biotechnological approaches to modify rapeseed oil composition for applications in aquaculture. *Plant Science* 2003 ; 165 : 349-57.
- 42.** CARTEA ME, MIGDAL M, GALLE AM, *et al.* Comparison of sense and antisense methodologies for modifying the fatty acid composition of *Arabidopsis thaliana* oilseed. *Plant Science* 2003 ; 136 : 181-94.
- 43.** JOLY PB. Les OGM en débat. Vers de nouveaux modes de gouvernance de l'innovation et des risques. *OCL* 2003 ; 10, 3 : 216-24.
- 44.** MESSEAN A, ANGEVIN F, COLBACH N, *et al.* Assessing the indirect and long-term ecological impacts of innovation in agriculture is a real challenge : the GM example. *OCL* 2003 ; 10, 3 : 195-7.

Illustrations

		Acide:	Formule:	
	AGS	Palmitique*	C16	
		stéarique*	C18	
	AGMI	Oléique*	C18:1	
	n-6	Linoléique *	C18:2, n-6	
		Arachidonique	C20:4, n-6	
	AGPI	n-3	Linoléique *	C18:3, n-3
			Eicosapentaénoïque	C20:5, n-3
			Docosahexaénoïque	C22:6, n-3

Figure 1. Principaux acides gras présents dans l'alimentation humaine : gras saturés (AGS), monoinsaturés (AGMI), et polyinsaturés (AGPI) de la série n-3 et n-6. Les flèches jaunes représentent les réactions de transformation (élongations, désaturations) des acides gras chez l'homme. La biotransformation de AGS ou AGMI en AGPI étant impossible, l'alimentation doit impérativement contenir les AGPI essentiels que sont les acides linoléique et linoléique si possible dans un ratio proche de 5/1. Les acides gras courants chez les plantes alimentaires sont notés*.

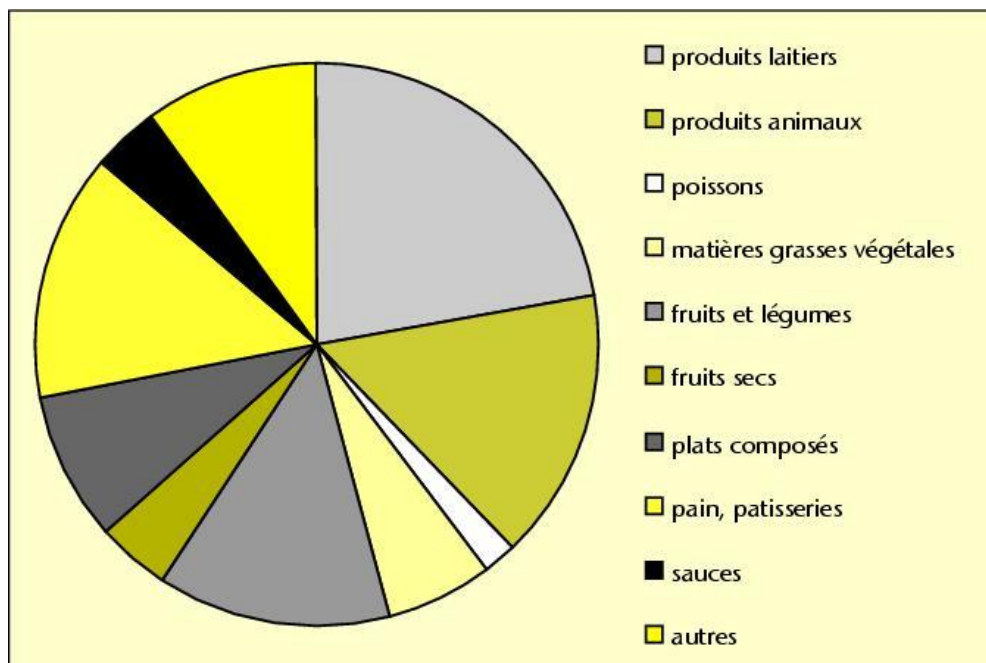


Figure 2. Contribution des aliments à l'apport d'ALA (hommes et femmes) d'après l'étude SU.VI.MAX (repris de [2]).