

Sommaire du CHAPITRE 11

Les légumineuses

Introduction	2
Taxonomie de la Famille des Fabacées	6

L'arachide

Description de la plante	7
Origine et évolution de l'arachide	8
Écologie et méthodes de culture	10
Utilisation, production et amélioration génétique	10
Statistiques de production d'arachides pour 2001 (FAOSTAT, révisé)	12

Le soja

Description de la plante de soja	13
Écologie et méthodes de culture	15
Utilisation du soja, statistiques et amélioration génétique	16
Statistiques de production de soja pour 2001 (FAOSTAT, révisé)	18

Introduction: Importance des Légumineuses

Les plantes de la famille des Fabacées (= Légumineuses, terme utilisé dans les systèmes de classification avant 1960) suivent en importance à celles de la famille des Poacées, non seulement pour leur contribution à l'alimentation humaine, mais aussi pour leur impact sur l'amélioration des pratiques agricoles dans toutes les régions du monde. Toutes les civilisations issues du développement agricole avaient choisi au moins une légumineuse en plus d'une céréale pour leur alimentation; soja et riz en Asie, lentilles et orge au Moyen-Orient, haricots et maïs en Amérique. Ces légumineuses faisaient déjà partie de l'ensemble de plantes qui étaient cueillies par les groupes humains nomades ou semi-nomades qui habitaient ces régions avant l'avènement de l'agriculture. Il est peu probable que, dans un premier temps, les graines de légumineuses auraient été intégrées à l'alimentation de ces peuples pour des considérations autres que le fait qu'elles étaient disponibles comme ressources, qu'elles avaient bon goût et qu'elles satisfaisaient leur faim. Ce choix s'est pourtant avéré très judicieux, car les graines de légumineuses sont des aliments d'excellente qualité et sont celles dont le contenu en protéines est parmi les plus élevés de toutes les plantes destinées à l'alimentation. Les graines des légumineuses contiennent entre 17 et 27 % de protéines, deux à trois fois plus que les graines des céréales majeures. Dans le cas d'une plante en particulier, le soja, le contenu en protéine des graines peut atteindre une valeur exceptionnelle de 50 % chez certaines variétés. Non seulement le contenu en protéines est élevé, mais la qualité de celles-ci, en considérant leur proportion en acides aminés, complémente bien celles des céréales majeures. Une combinaison de céréales et de légumineuses dans une diète alimentaire journalière pourvoit une alimentation plus équilibrée que si

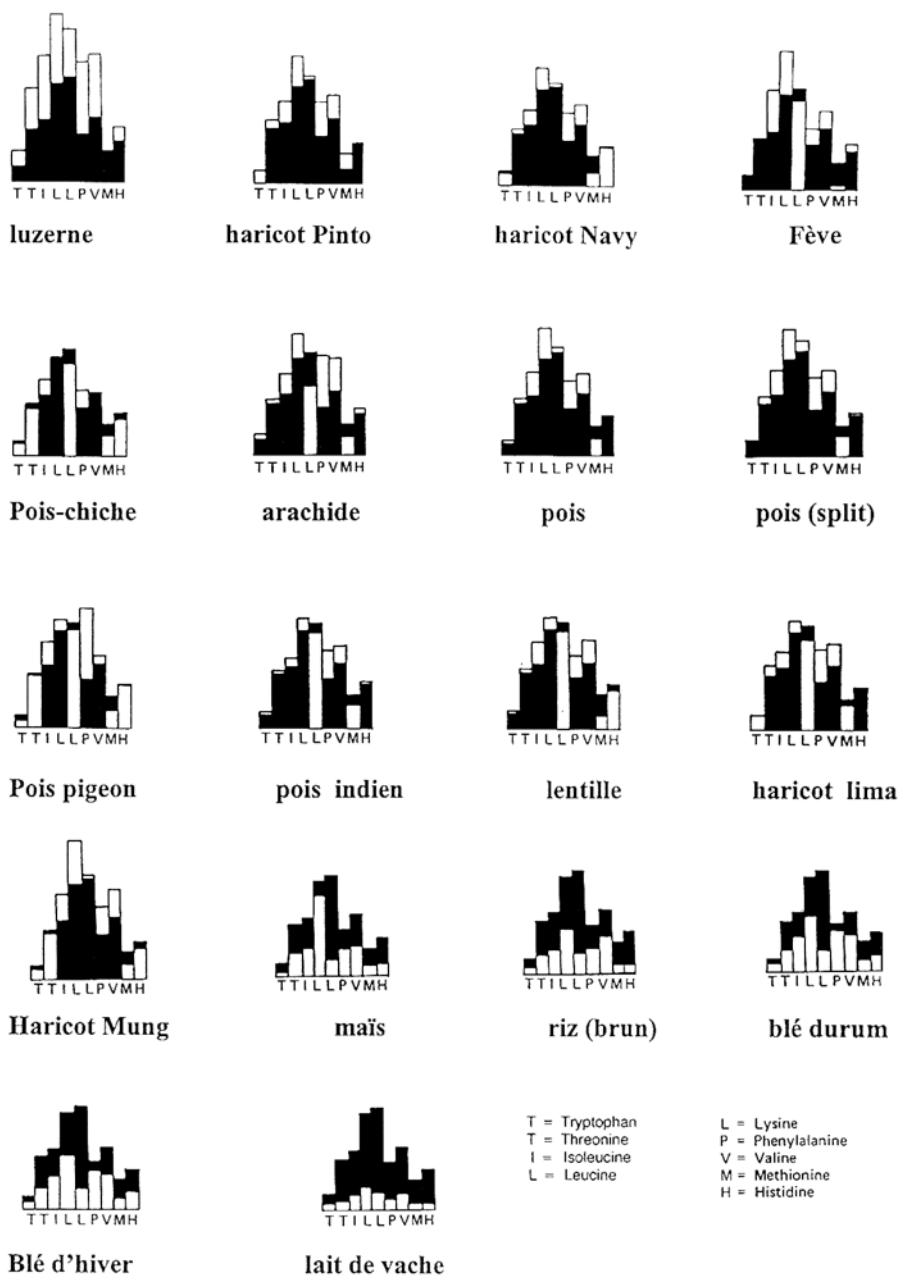


Figure 1.- Le contenu en acides aminés de plusieurs espèces de légumineuses et céréales dans 100g de portion alimentaire. Le profil en noir représente les teneurs en acides aminés d'un steak de bœuf, considéré comme une source complète de protéines. Notez que, à l'exception de la méthionine, les profils des graphiques des légumineuses superposés à celui de la viande sont comparables dans leurs profils d'acides aminés à ce dernier. Par contre, les teneurs d'acides aminés des céréales sont, par comparaison, plus bas que ceux de la viande ou des légumineuses, sauf pour la méthionine dont les teneurs sont comparables à celles des légumineuses (modifié de Simpson & Ogorzal 1995).

elle était exclusivement composée de céréales. Bien que chez certaines légumineuses les proportions relatives de certains acides aminés essentiels, tels que l'isoleucine, la lysine et la méthionine, peuvent être au-dessous des besoins requis pour une nutrition équilibrée, leur concentration élevée en protéines réduit considérablement l'effet de ces carences.

Comparé aux profils du contenu en acides aminés de la protéine d'un filet de bœuf, considéré ici comme la protéine étalon la plus équilibrée, une combinaison judicieuse de sources de protéines de céréales et de légumineuses se compare en qualité aux protéines d'origine animale. Il faut noter qu'une analyse du profil d'acides aminés de différentes protéines indique des taux plus élevés d'acides aminés chez plusieurs protéines provenant de légumineuses comparativement aux protéines d'origine animale (**Figure 1**).

Il est surprenant de constater que, même sans connaître la valeur nutritionnelle des protéines et l'importance des acides aminés de celles-ci, les premiers peuples agricoles intuitivement ont reconnu l'avantage nutritionnel apporté par la combinaison de céréales et de légumineuses dans leur régime. Cette utilisation mixte, considérée comme un "phénomène accidentel particulièrement heureux" par Heiser (1990), a sans aucun doute contribué à accélérer le processus de développement de sociétés agricoles de plus en plus structurées et organisées qui se sont succédées pendant la période du Néolithique et qui ont culminé par le développement de plusieurs civilisations avancées.

Un avantage des légumineuses qui a contribué au contenu élevé de protéines dans leurs tissus, est leur capacité de former des associations symbiotiques avec des bactéries fixatrices d'azote atmosphérique. Ces bactéries du genre *Rhizobium* (Azobacteriaceae) infectent les poils radiculaires des racines de la plupart des légumineuses en produisant des **nodules** (**Figure 2**). Les bactéries habitent et se multiplient dans ces nodules et absorbent des éléments nutritifs de la plante. Sous des conditions expérimentales où les plantes sont pourvues de tous les éléments nutritifs pour leur croissance (par exemple, application optimale d'engrais), les bactéries utilisent des ressources de la plante sans apporter grand chose en échange et, de fait, se comportent en parasites. Sous des conditions normales de culture, deux des éléments nutritifs requis par les plantes, l'azote et le phosphore assimilables, sont souvent en quantités limitantes dans les sols. Bien que l'azote gazeux soit l'élément le plus abondant de l'atmosphère terrestre, les plantes à fleurs ne peuvent pas l'utiliser sous cette forme. L'azote ne peut être assimilé que sous la forme d'ions de nitrites, nitrates et d'ammonium ou il peut être aussi assimilé à partir de sources issues de la décomposition de certains composés organiques. Ces sources d'azote sont la plupart du temps en quantités réduites dans les sols et il est nécessaire de fournir des engrais riches en azote pour couvrir les besoins des plantations agricoles. Les légumineuses, ainsi

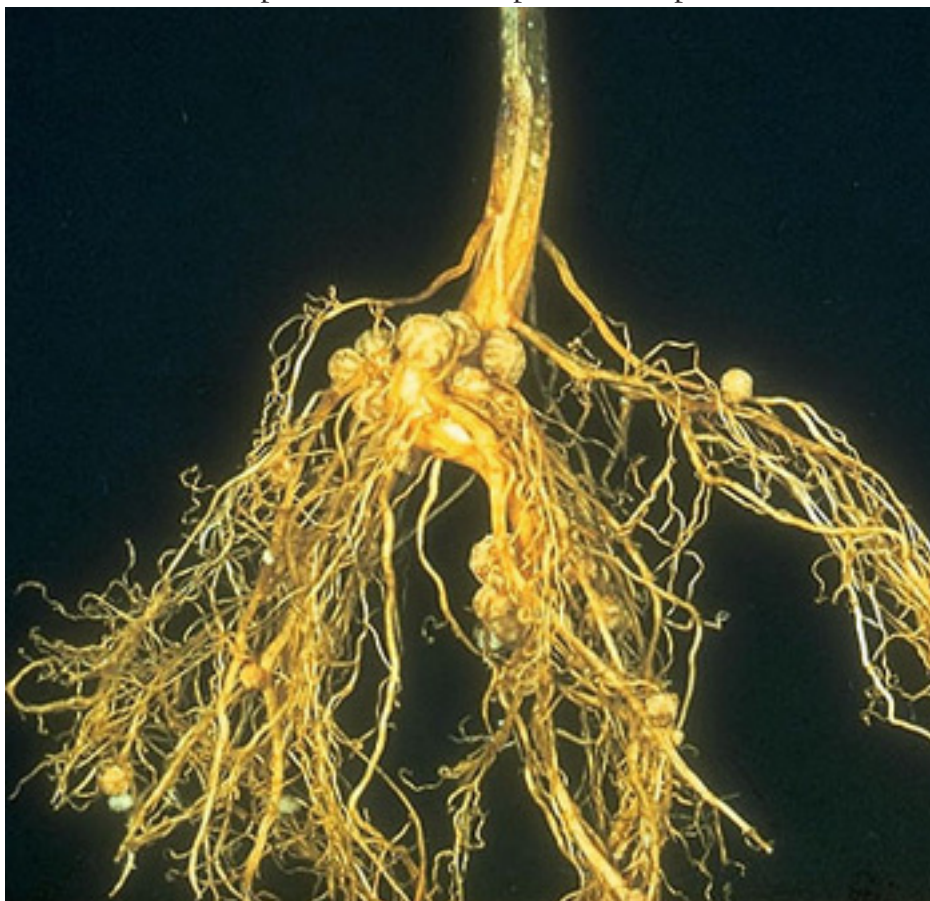


Figure 2. - Nodulation bactérienne (*Rhizobium leguminosarum*) sur les racines du soja (*Glycine max*).

que quelques autres plantes appartenant à diverses familles^{*}, ont l'avantage, par le biais de la symbiose bactérienne, d'accéder à des sources d'azote atmosphérique.

Les bactéries de *Rhizobium*, au cours de leurs activités métaboliques, convertissent l'azote atmosphérique en ammonium, une source d'azote assimilable. Cet ammonium assimilable est transloqué des nodules au système de transport des racines et est utilisé par la plante pour ses fonctions métaboliques et physiologiques. L'avantage pour les plantes de légumineuses est évident, car le coût rattaché à "héberger" et à pourvoir en énergie les bactéries nitrificatrices est avantageusement compensé par l'apport d'azote supplémentaire, qui autrement ne serait pas disponible. Les bactéries fixatrices d'azote sont largement distribuées parmi les espèces spontanées de légumineuses et peuvent survivre pendant plusieurs années dans les sols. Néanmoins, il est coutume d'inoculer les semences de légumineuses avec *Rhizobium* lorsque celles-ci sont plantées pour la première fois dans des champs. Du fait qu'il existe 12 races de *Rhizobium* possédant chacune une certaine spécificité quant à leur capacité de former des nodules avec différents genres et espèces de légumineuses, il est important de choisir la race de bactérie qui sera la plus compatible avec l'espèce semée et la fixatrice d'azote la plus apte dans les conditions sur le terrain.

L'impact des légumineuses ne se réduit pas seulement à leur importance comme source alimentaire de qualité. Leur utilisation joue aussi un rôle important dans le maintien de la fertilité des sols agricoles. Le fait est que les plantes des légumineuses accumulent des concentrations d'azote importantes dans leurs tissus. Une partie de cet azote, particulièrement au niveau des racines, est éventuellement réincorporé au sol lors de la décomposition des tissus. Ainsi les plantations de légumineuses permettent de rétablir la fertilité des sols après la culture de plantes plus exigeantes, telles que les céréales et autres espèces, qui ont tendance à appauvrir les sols. La pratique de **rotation des cultures** permet d'alterner des récoltes de céréales et de légumineuses. Le cycle de rotation varie dépendant des régions, de la qualité des sols et des cultures pratiquées. Les fermiers ont tendance à favoriser une rotation sur trois ans, deux ans de céréales suivies d'une année de légumineuses. Sous ces conditions, non seulement la fertilité des sols est maintenue, mais la production des céréales est augmentée du fait de l'apport d'azote et d'autres éléments nutritifs issus du processus de nitrification symbiotique. Ces avantages ont été notés par les premières civilisations agricoles du Moyen-Orient. En effet, ces civilisations pratiquaient, il y a près de 6 000 ans, des rotations de cultures en incluant des légumineuses dans leurs cycles. Les effets positifs de la rotation de cultures sont augmentés si, suite à la récolte de graines de légumineuses, les tissus végétatifs des plantes sont réincorporés au sol lors du labourage. Cet ajout d'**engrais vert** permet d'enrichir encore plus les sols, ce qui permettra des récoltes plus importantes de céréales (ou d'autres plantes) et, dans certains cas, d'allonger le cycle de rotation.

S'il est vrai que l'importance particulière des légumineuses sur le développement de l'agriculture et de l'alimentation est bien reconnue, certains membres de cette famille sont des mauvaises herbes particulièrement difficiles à contrôler. Un exemple typique est le kudzu (*Pueraria lobata*) qui dans les régions tropicales et subtropicales, envahit et étouffe littéralement la végétation, même arborescente, à l'aide de ces vignes agressives.

Plusieurs espèces de légumineuses produisent des substances toxiques qui, dans certains cas, peuvent être mortelles si ingérées. Les taxons concernés sont surtout des espèces spontanées qui ne sont pas utilisées comme plantes agricoles. C'est le cas du pois du rosier (*Abrus precatorius*), une vigne distribuée largement dans les régions tropicales du globe, qui concentre dans ses graines un alcaloïde, l'**abrine** (**Figure 3A**), qui est le produit toxique le plus puissant que l'on connaisse. Comme les graines de cette plante sont très colorées (rouge et

* Les espèces des Fabacées ne sont pas les seules à bénéficier de ce type de symbiose. Quelques 370 espèces appartenant à 13 familles différentes dont les Bétulacées, Moracées, Podocarpacees, Rhamnacees, Casuarinacees, etc., interagissent en symbiose avec des bactéries de nitrification. Ces bactéries appartiennent à un genre différent, le genre *Actinomyces* et, dans certains cas, la nodulation n'est pas réalisée au niveau des racines, mais se fait sur les feuilles.

noir) elles sont utilisées pour confectionner de colliers destinés aux touristes. L'ingestion d'une seule graine de cette plante peut causer la mort d'un adulte. Pourtant, dans certaines régions d'Afrique, celles-ci sont consommées suite à une cuisson sans qu'il y ait des effets négatifs apparents.

Dans les zones semi-désertiques des régions montagneuses des Rocheuses, les très nombreuses espèces d'oxytropes et d'astragales (*Oxytropus*, *Astragalus*) produisent des alcaloïdes très toxiques (**Figure 3B**) qui causent la mort des animaux de ferme qui les consomment par inadvertance. D'autres plantes, bien que peu toxiques pour les humains, peuvent être mortelles pour les insectes et pour certains vertébrés. C'est le cas de *Derris elliptica*, d'origine asiatique, et des espèces des genres sud-américains *Lonchocarpus* et *Pachyrrhizus* qui synthétisent un phénol méthylé de structure complexe, la **rotenone** (**Figure 3C**). Bien avant que l'on découvre les propriétés toxiques de ces plantes, des indigènes les utilisaient en les broyant dans les ruisseaux, pour paralyser les poissons qui remontaient à la surface et qui, après cuisson, pouvaient être consommés sans danger.

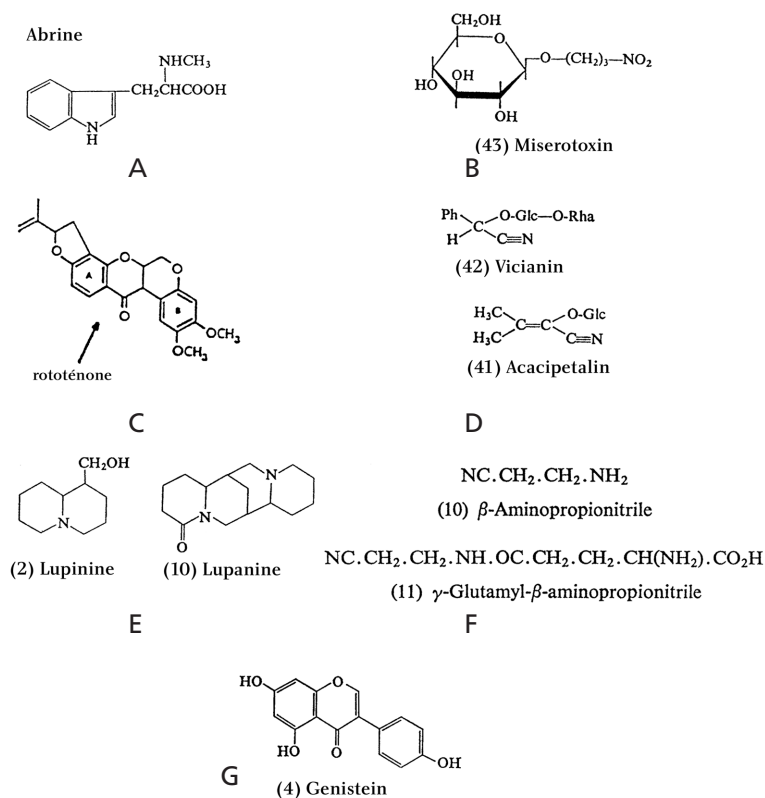


Figure 3.- Produits secondaires synthétisés par des espèces de Fabacées qui peuvent être toxiques aux animaux, incluant l'homme.

Des produits toxiques peuvent être aussi présents parmi les espèces cultivées ou les espèces spontanées qui sont cultivées en certaines occasions. Pour éviter la toxicité, des programmes de sélection ont été effectués pour diminuer les concentrations de ces produits, mais parfois ceux-ci demeurent élevés et des cas d'intoxication se produisent. Un exemple est le cas des haricots lima (*Phaseolus lunatus*), dont le goût particulier des fèves est dû à la présence de **glycosides cyanogéniques** (**Figure 3D**) lesquels, à la suite d'une hydrolyse provoquée par la macération, libère du cyanure. En Amérique du Nord, on a sélectionné des variétés qui contiennent de basses concentrations de ces substances et une cuisson prolongée permet de volatiliser les traces de cyanure qui pourraient être présentes. Dans certaines îles des Caraïbes, on cultive encore des variétés de haricots lima qui contiennent des concentrations suffisamment élevées de glycosides cyanogéniques pour produire des intoxications, parfois mortelles, surtout si la quantité consommée par repas est trop importante ou si ces haricots n'ont pas été parfaitement cuits.

Parmi les lupins (*Lupinus*), plus connus comme plantes ornementales, les graines de certaines espèces sont utilisées pour l'alimentation. Les plantes de ce genre contiennent un groupe d'alcaloïdes très toxique, la **lupinine** ou **lupanine** (**Figure 3E**). En Europe, on a sélectionné depuis l'Antiquité des variétés qui sont dépourvues de ces alcaloïdes. Ces variétés se vendent dans les marchés sous le nom de haricots lupini. Les Amérindiens des régions andéennes en haute altitude ont utilisé une stratégie différente pour s'alimenter des graines de *Lupinus mutabilis*, le tarwi ou chocho, qui contient de la lupinine en quantité élevée. Préalablement à la cuisson, ils trempaient les graines dans de grands volumes d'eau pendant plusieurs jours afin de retirer l'alcaloïde des graines par diffusion.

Deux maladies, le **lathyrisme** et le **favisme**, sont associées à la consommation de légumes. Le lathyrisme affecte les personnes qui consomment de grandes quantités de graines d'espèces de *Lathyrus* pendant des périodes de temps prolongées. Cette situation peut se produire parmi les populations les plus défavorisées

lesquelles, dans des périodes de disette, se rabattent sur ces légumes qui sont résistants à la sécheresse, adaptés aux sols pauvres et faciles à cultiver. La surconsommation cause une paralysie progressive des membres inférieurs qui peut devenir permanente, suivie de complications neuro-squelettiques plus généralisées qui provoquent éventuellement la mort du patient. Les responsables de cette maladie sont deux acides aminés de structures modifiées (**Figure 3F**) qui sont présents en assez grandes concentrations dans les graines de *Lathyrus*. A la suite de l'ingestion des graines et au cours de la synthèse des protéines chez le patient, les ARNs de transfert reconnaissent ces acides aminés comme faisant partie des 21 acides aminés protéiniques. Ils sont ainsi incorporés dans la synthèse des polypeptides de protéines et d'enzymes qui sont structurellement modifiées et non fonctionnelles, produisant des déséquilibres métaboliques et physiologiques majeurs. Cette maladie était présente parmi des populations de certaines régions semi-désertiques de l'Inde et du Pakistan dans des périodes récentes, mais elle a aussi été rapportée en Europe et dans les régions de la Méditerranée au cours de l'Antiquité et du Moyen Âge.

Le favisme produit une anémie hémolytique aiguë qui se déclare chez les personnes qui consomment des graines crues, partiellement cuites ou qui inhalent le pollen de fèves ou gourges (*Vicia faba* L.). Cette maladie héréditaire affecte une partie de la population masculine originaire de la région méditerranéenne, en particulier d'Afrique du Nord. Les individus déficients en glucose-6-phosphate deshydrogénase (environ 3% de la population masculine) ne sont pas capables de contrecarrer l'action oxydant des alcaloïdes produits par les fèves, ce qui résulte en l'hémolyse d'une proportion importante des globules rouges du sang.

Un autre exemple de l'effet pernicieux que peuvent produire des substances accumulées dans les graines de légumineuses est celui de la luzerne (*Medicago sativa*) et du trèfle souterrain (*Trifolium subterraneum*), utilisés dans les pâturages d'ovins en Australie. Jusqu'en 1970, les graines et les parties végétatives de plusieurs variétés commerciales de ces deux plantes possédaient des accumulations de certains phénols, les **isoflavones** qui ont des propriétés oestrogéniques. Deux substances en particulier, le **coumestrol** et la **genistein** (**Figure 3G**), provoquaient l'avortement lorsqu'elles étaient ingérées en doses relativement modestes. Des programmes d'amélioration génétique et de sélection utilisant des agents mutagéniques chimiques ont permis de développer des variétés dont la synthèse de ces produits est bloquée au niveau des précurseurs qui eux ne sont pas toxiques. Bien que ces nouvelles variétés soient maintenant utilisées dans la plupart des pays industrialisés, il existe encore bien des variétés hautes en teneurs d'isoflavones. Vu l'engouement qui existe pour les salades de graines germées de luzerne, il serait plus prudent que les femmes enceintes s'assurent que ces graines proviennent de variétés à basse teneur d'isoflavones.

Taxonomie de la Famille des Fabacées

La famille des Fabacées (Légumineuses) est représentée par 12 000 à 17 000 espèces (dépendant des taxonomistes) de formes et types de croissance très diversifiées. Sur la base de leurs caractéristiques florales, les botanistes s'entendent à regrouper ces

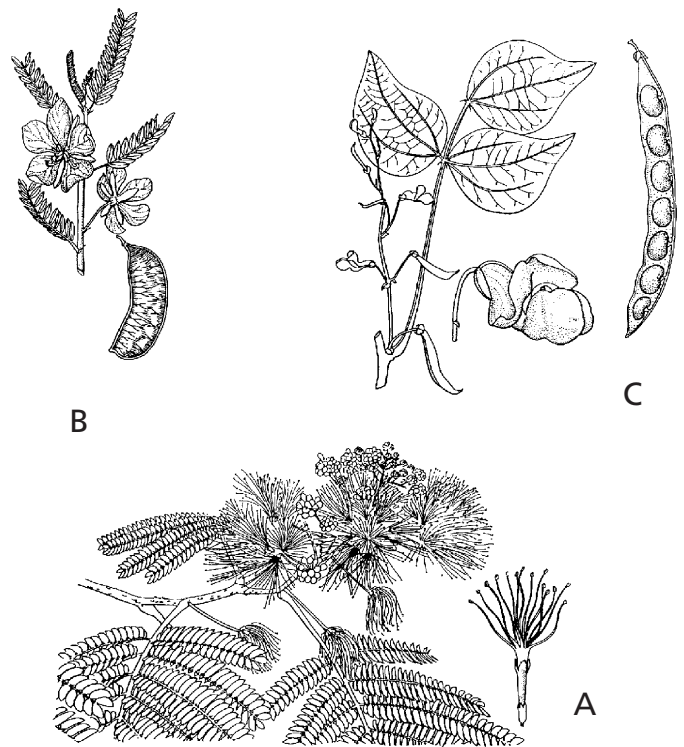


Figure 4.- Les espèces des sous-familles des Fabacées diffèrent dans leurs caractéristiques florales: A) Mimosa, comme toutes les espèces de la sous-espèce des Mimosoideae, possède des fleurs régulières de petites dimensions regroupées en faisceaux; B) les Caesalpinoideae, illustré par Cassia, possède des fleurs irrégulières dans lesquelles le pétale supérieur est situé à l'extérieur des autres pétales et les étamines sont généralement libres; C) le haricot commun, comme la plupart des autres espèces des Faboideae, possède des fleurs irrégulières dont le pétale supérieur (étendard) est situé à l'extérieur des pétales latéraux (ailes). La quille formée de deux pétales inférieurs soudés renferme le style et les étamines soudées et regroupées de diverses façons (modifié de Simpson & Ogorzaly 1995).

espèces sous trois sous-familles.

Nonobstant leurs différences florales, tous les taxons des Fabacées produisent la même sorte de fruit, le légume, formé par un seul carpelle possédant deux zones de suture opposées qui, chez les espèces spontanées, s'ouvrent à maturité pour expulser les graines.

La sous-famille des Mimosoïdeae, comprend environ 2 500 espèces regroupées dans quelques 40 genres. Elles produisent des fleurs régulières (actinomorphes) regroupées en inflorescences denses (**figure 4A**). Les espèces sont représentées principalement par des arbres et des arbustes distribués dans les régions tropicales et subtropicales sur tous les continents. Les genres *Acacia* (350 espèces), *Calliandra* (150 espèces), *Mimosa* (380 espèces) et *Prosopis* (22 espèces) sont les plus représentatifs.

La sous famille des Caesalpinoïdeae, considérée comme la plus primitive, regroupe environ 4 200 espèces dans quelques 135 genres. Les espèces possèdent des fleurs aux corolles irrégulières (zygomorphes; **figure 4B**) et sont représentées par des arbres, arbustes et herbacées vivaces distribuées des régions tropicales aux régions tempérées. Les genres *Caesalpinia* (35 espèces), *Cassia* (450 espèces), *Cercis* (7 espèces) et *Gleditzia* (75 espèces) sont représentatifs de cette sous-famille.

La sous-famille Lotoïdeae, d'une évolution plus récente, est la plus importante au point de vue alimentaire. Elle comprend quelques 9 500 espèces aux fleurs irrégulières (**Figure 4C**), regroupées dans environ 375 genres qui sont représentés majoritairement par des espèces herbacées vivaces et annuelles. C'est parmi cette dernière catégorie que nous retrouvons toutes les espèces importantes utilisées pour l'alimentation humaine directe ainsi que les plantes de pâturage les plus importantes utilisées par les agriculteurs.

L'arachide

L'arachide (*Arachis hypogaea* L.) est une plante d'origine sud-américaine qui produit ses fruits sous terre. Elle est économiquement importante non seulement pour la qualité de ses protéines, mais aussi pour l'huile extraite qui est utilisée dans l'alimentation humaine. De nos jours, la culture de l'arachide est plus importante dans les régions tropicales et subtropicales de l'Asie et de l'Afrique que dans les régions d'où elle est originaire.

Description de la plante

La plante d'arachide est une herbacée annuelle ($2n = 40$) qui possède une photosynthèse en C_3 . À partir de la germination de la graine naît une plante avec une racine pivotante dont les racelles terminales sont dépourvues de poils radiculaires absorbants. L'absorption de l'eau et des nutriments se fait dans une région de la racine localisée à 1 cm de son apex. Dépendant des variétés, la plante peut être érigée ou prostrée et mesure à maturité de 60 cm à 1 m 20 de hauteur ou de diamètre. Elle produit des feuilles composées aux stipules proéminentes ayant deux groupes de folioles opposées (4-7) de forme obovate (**Figure 5A,B**). La floraison est séquentielle (non-déterminée) et des fleurs zygomorphes hermaphrodites, typiques des membres de la sous-famille des Lotoïdeae, sont produites individuellement ou par groupes de 2-3 à l'insertion des feuilles inférieures sur la tige. Les fleurs sont plus nombreuses aux nœuds inférieurs et sont composées de cinq sépales, cinq pétales jaunes (dont deux sont soudées pour former la quille en plus d'un étendard et de deux ailes), 12 étamines (dont 10 sont fusées et deux sont libres), et d'un ovaire infère unicarpellaire contenant 2 à 6 ovules (**Figure 5B**). Les fleurs sont cléistogames et sont donc autopolinisées. Après la fécondation, un méristème intercalaire se développe à partir de la base de l'ovaire et dirige le fruit en formation vers le sol. Ce méristème se développe en longueur et peut atteindre jusqu'à 20 cm. Pendant que le méristème s'allonge, la base du style s'endurcit et produit un apex protecteur qui permet à l'ovaire de s'enfoncer dans le sol sans qu'il soit endommagé. Le péricarpe

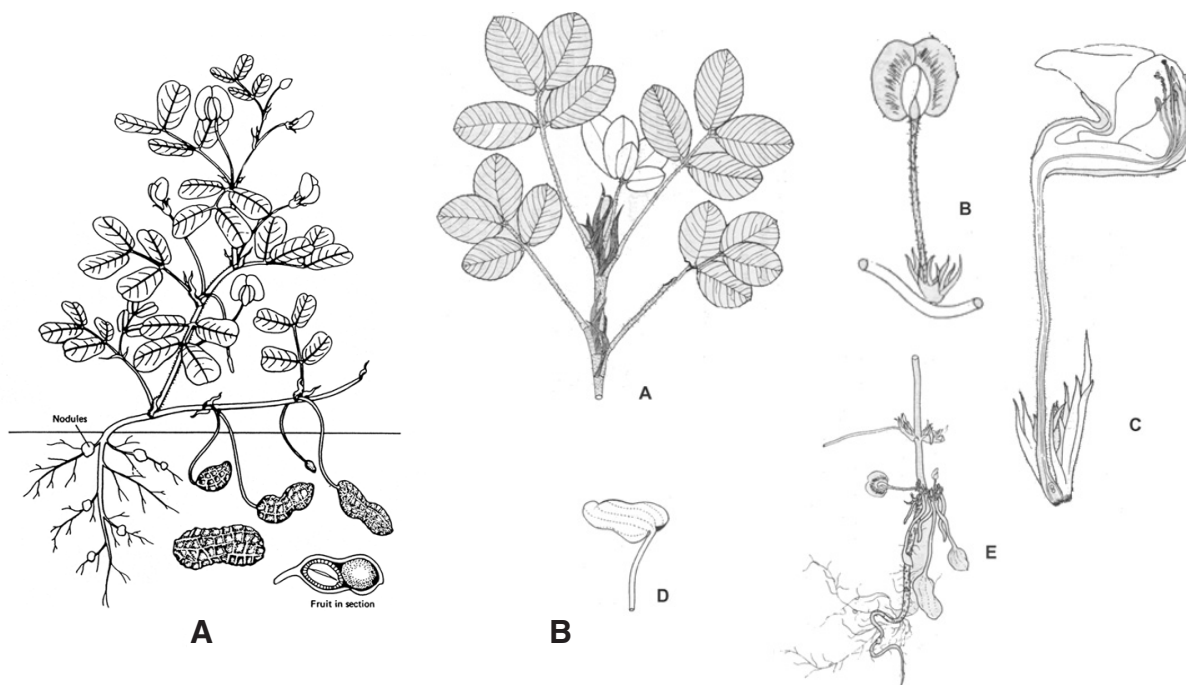


Figure 5.- (A) Plante d'arachide à maturité. Suite à la fertilisation autogame, les pédoncules des fleurs se développent vers le sol par le biais d'un méristème intercalaire situé sous l'ovaire et le fruit en développement est dirigé vers le sol et pénètre dans le sol (géotropisme positif) par l'élongation du pédoncule qui peut atteindre 8-15 cm de longueur. Le fruit (une gousse modifiée appelée un carpophore) atteint sa maturité dans le sol. (B) Détails des structures de la plante d'arachide A.- branche et feuilles composées, stipules ; B.- fleur irrégulière à cinq pétales (zygomorphe) ; C.- fleur en coupe longitudinale ; D.- fruit en développement ; E.- base d'un plant montrant une fleur, des fruits en développement et des racines et nodules bactériens (symbiose avec *Rhizobium* pour l'assimilation d'azote atmosphérique).

du fruit devient lignifié et, à mesure que l'ovaire en expansion s'enfonce dans le sol, des réticulations et une dizaine de côtes fibreuses se développent dans le mésocarpe. La croissance du méristème intercalaire cesse quand l'ovaire est situé à quelques centimètres sous la surface du sol. Le fruit en formation se positionne horizontalement et continue son développement jusqu'à maturité. Ce fruit un peu particulier reçoit le nom de **carpophore**, bien que sa structure soit celle d'une gousse typique de Légumineuse (**Figure 5A,B**). Le stimulus qui provoque le mouvement de l'ovaire en expansion vers le sol est bien le géotropisme positif et non, comme on l'a cru pendant un certain temps, un phototropisme négatif. Les carpophores de l'arachide ne sont pas déhiscent à maturité contrairement à ceux des espèces spontanées d'*Arachis*. Les fruits produisent de 2 à 3 graines de forme ovoïde dont la couleur de la testa peut varier de blanche à marron en passant par le jaune et le rouge. Comme toutes les graines de légumineuses, celles de l'arachide ne contiennent pas d'albumen (endosperme), mais consistent en deux cotylédons massifs entourant le germe (embryon).

Origine et évolution de l'arachide

Le genre *Arachis* est représenté par environ 17 espèces vivaces qui possèdent un développement géotropique positif pour leurs fruits. Le centre de diversité botanique de ce genre est situé dans la région équatoriale délimitée par une zone comprenant le centre-sud du Brésil et le nord du Paraguay. Le centre primaire se situe à l'ouest de cette zone, dans les contreforts de la Cordillère des Andes dans la région limitrophe entre le nord-ouest de l'Argentine et le sud-est de la Bolivie (**Figure 6**). Ce centre primaire contient l'espèce spontanée annuelle *A. monticola* ($2n=40$) laquelle, d'après les récentes analyses de génétiques et d'ADN, est maintenant reconnue comme l'ancêtre de l'arachide. *A. monticola* aurait évolué à la suite de croisement entre certains taxons inclus dans le complexe de formes annuelles associées à *A. villosa* ($2n=20$). Suite à ces croisements il y aurait eu polyploïdisation. L'arachide aurait été domestiquée à partir de *A. monticola* dans la région des Yungas boliviennes,

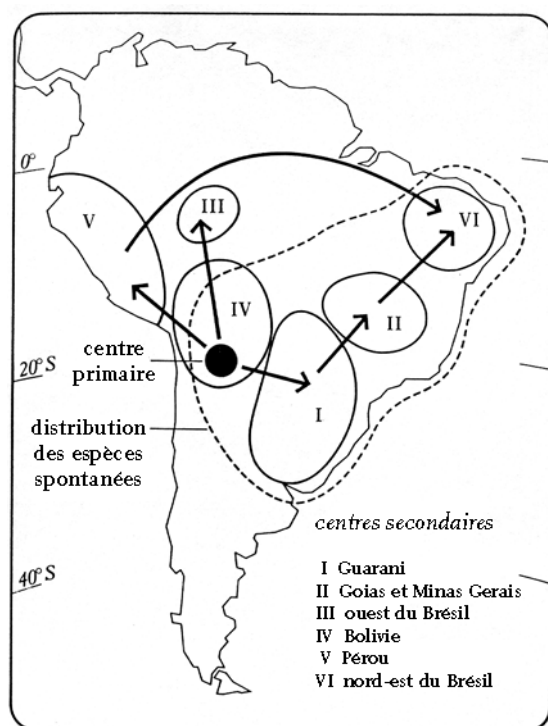


Figure 6.- Régions d'Amérique du Sud où sont situés les centres d'origine primaire et secondaires de l'arachide, *Arachis hypogaea* (modifié de Simmonds 1976).

sur le versant est de la Cordillère des Andes, une région placée plus au nord que celle où est présentement distribuée *A. monticola*.

Les preuves archéologiques les plus anciennes de la domestication de l'arachide, remontant à 3,800 années A.P., ont été découvertes dans le site de Huaca Prieta, sur la côte pacifique du Pérou. Étant donné que cette région est très éloignée de la région du centre d'origine botanique de l'arachide, il est logique de penser que la date de sa première domestication est certainement antérieure. La culture de l'arachide fut exportée et diffusée en Amérique centrale pendant la période pré colombienne, car sa présence a été rapportée dans les fouilles archéologiques de Téhucan au Mexique dans les niveaux d'occupation datés du premier siècle de notre ère. Les civilisations Maya et Aztèque cultivaient l'arachide. Les Aztèques la nommaient "*tlaltacahuatl*", ce qui veut dire "cacao sous terre", pour indiquer la ressemblance des carpophores de l'arachide avec les fruits que l'arbre de cacao produit sur son tronc. Les Espagnols transformèrent phonétiquement le nom aztèque *tlaltacahuatl* en "cacahuate" duquel provient le nom français "cacahuète". Tel que rapporté lors des premiers voyages de Colomb, l'arachide était aussi cultivée à cette époque dans plusieurs îles des Caraïbes, où elle était nommée "*mani*" par les Amérindiens de ces régions.

Les Portugais exportèrent la culture de l'arachide en Afrique de l'Ouest vers la fin du 16^{ème} siècle tandis que les Espagnols l'introduisirent aux Philippines à partir du Pérou vers 1730. Des Philippines, elle fut exportée, au cours du 17^{ème} siècle, vers la Malaisie, la Chine, l'Inde, le Japon et l'île de Madagascar. L'arachide fut introduite aux États-Unis vers la fin du 17^{ème} siècle de façon indirecte par les esclaves venant d'Afrique de l'Ouest. Ces esclaves étaient destinés aux travaux forcés dans les plantations de coton des états du sud et du sud-est des États-Unis. Présentement, l'arachide est cultivée dans toutes les régions tropicales et subtropicales du monde.

L' Arachide (*Arachis hypogaea*)

sous-espèces et variétés de *Arachis hypogaea* L.

a.- *ssp. hypogaea* : Plantes prostrées; longue période végétative (5-10 mois); 2 graines par gousse; 36-47 % d'huile; dormance des graines; résistance à la *Cercospora* .

1.- **var. *virginiana*:** peu pubescente; branches courtes

2.- **var. *brésilienne*:** densément pubescente; branches longues

b.- *ssp. fastigiata* : plantes érigées; période végétative courte (3-5 mois); permet deux cultures par an; 45-50 % d'huile; graines non-dormantes; susceptible à la *Cercospora*

1.- **var. *espagnole*:** 2 graines par gousse; plante très branchée

2.- **var. *valencienne*:** 3-4 graines par gousse; plante peu branchée

Tableau 1

Tel que mentionné au **tableau 1**, deux sous-espèces d'arachide, comprenant chacune 2 groupes de variétés, sont décrites dans la littérature. Ces sous-espèces présentent des différences quant à leur types de croissance, leur phénologie, le contenu en huile et la dormance des graines ainsi que la résistance au *Cercospora*, une maladie bactérienne.

Écologie et méthodes de culture

L'arachide est une plante adaptée aux régions de climats tropicaux à tempérés-chauds et elle est cultivée dans les régions comprises entre les 40° de latitude Nord et Sud, là où il n'y a pas de gels pendant sa période de croissance. Sa croissance est favorisée par des températures journalières oscillant entre 27° et 33° C et qui ne descendent pas sous 1 °C. La plante doit recevoir au moins 500 mm de pluies bien distribuées pendant les 3 à 5 mois nécessaires à son développement végétatif. Du fait que ses fruits sont produits sous terre et qu'elle requière des sols bien drainés et aérés, les sols de texture légère au pH neutre (pH 6.5-7.2) sont favorisés pour sa culture. L'arachide est une plante qui répond bien aux engrais azotés, aux ajouts de matière organique, de Ca et de S et de Cobalt, ces deux derniers oligo-éléments favorisant la nodulation bactérienne.

Les plantations d'arachide se font sur des terres labourées et bien préparées. Les graines sont semées sur des sillons séparés d'environ 70 cm. Les graines, préalablement inoculées avec la race de *Rhizobium* adéquate, sont plantées de façon espacée pour produire des plants équidistants de 40-50 cm environ, ce qui donne environ une densité de 70 000 plantes par hectare. Pendant les premières phases du développement des plantules il faut contrôler les mauvaises herbes, car les plantes sont peu compétitives à ce stade. Les variétés hâtives de la sous-espèce *fastigiata* sont prêtes pour la moisson environ 3 mois après les semailles, tandis que pour certaines variétés de la sous-espèce *hypogaea* il faut de 7 à 10 mois pour obtenir une récolte. La récolte peut être faite à la main en arrachant simplement les plantes ou elle peut être mécanisée à l'aide de récolteuses modifiées portant des râteaux frontaux inclinés qui s'enfoncent dans le sol et soulèvent les plantes. Celles-ci sont séchées pendant quelques jours sur la surface du sol, où sur des treillis dans le cas de moissons manuelles, avant d'être secouées et passées sur des tamis pour séparer les "grappes" de fruits du reste de la plante. La partie végétale est réincorporée au sol et utilisée comme engrais vert pour des rotations de cultures impliquant le coton, le maïs ou d'autres céréales.

Utilisation, production et amélioration génétique :

L'arachide est destinée principalement à l'alimentation humaine, car le contenu en protéines de ces graines, en moyenne 26 %, et les teneurs élevées en vitamines B et E en font un aliment de qualité. Dépendant des variétés, les graines d'arachide contiennent aussi entre 36 et 50 % d'huile d'une bonne qualité. L'huile d'arachide est un produit relativement moderne, car elle a été extraite pour la première fois de façon industrielle à Marseille en 1870 quand des arachides importées d'Afrique ont été broyées dans des moulins de pierre destinés à la préparation de l'huile d'olive. De nos jours, la méthode d'extraction est devenue plus sophistiquée. Les graines d'arachide sont séchées et les testa des graines doivent être séparés par tamisage avant que celles-ci soient broyées et l'huile séparée et purifiée en employant une série de solvants organiques. Bien que l'huile d'arachide solidifie aux températures inférieures à 5° C, elle est appréciée, car elle ne produit pas de fumée quand elle est chauffée et elle donne un bon goût à la nourriture. Son extraction à partir des graines permet de préparer des concentrés protéiniques qui sont utilisés pour l'alimentation humaine directe dans les pays du Tiers-Monde (en particulier en Inde, au Brésil et au Nigeria), mais sont surtout destinés à l'alimentation des animaux de ferme dans les pays industrialisés.

Une proportion élevée de la récolte d'arachide mondiale, estimée à 70 % de la production de 34,1 MTM (2001), est destinée à la production d'huile. Par contre, aux États-Unis moins du quart de la production d'arachide est destinée à cette fin, car, depuis 1960, le maïs et le soja, dont les productions sont de loin plus importantes, ont remplacé l'arachide comme source d'huile pour l'alimentation dans ce pays. Par contre, près des deux tiers de la production d'arachide nord-américaine est destinée à la préparation du beurre d'arachide. Bien que pendant la période pré colombienne les peuples indigènes de l'Amérique du Sud broyaient déjà les arachides

dans une sorte de pâte semblable au beurre d'arachide "moderne", la confection industrielle de celui-ci est attribuée au médecin américain John Harvey Kellogg, le frère du fondateur de la compagnie Kellogg, William K. Kellogg. Vers 1890, ce médecin, qui soignait des patients âgés dans les hospices, dont la plupart avaient perdu leurs dents, était à la recherche d'une source d'aliment nutritif et bien équilibré qui ne demandait pas d'effort de mastication. Il a eu l'idée de préparer une pâte à partir des graines d'arachide à laquelle il ajouta 1-2 % de sel. Cette pâte onctueuse fut adoptée avec grand enthousiasme par ses patients qui virent leur santé s'améliorer de façon significative. Le beurre d'arachide était né et, de nos jours, il est devenu une source alimentaire incontournable pour la préparation des snacks et sandwiches des jeunes écoliers américains. Les deux frères Kellogg se sont associés par la suite pour commercialiser les flocons de céréales qui avaient aussi été "inventés" par J. H. Kellogg au sanatorium de Battle Creek, Arkansas. L'industrie du beurre d'arachide est, par la suite, devenue plus complexe et utilise des substances stabilisatrices pour éviter que l'huile se sépare de la pâte. La confection de bonbons et autres sucreries utilisait en 2001 plus de 110 000 TM de la production américaine d'arachide estimée à 1,9 MTM. Près de 7 MTM d'arachides furent exportées vers l'Europe par les principaux pays producteurs comme le Nigeria, la Chine, le Brésil, l'Indonésie et les États-Unis, ce qui représentait entre 70 % (Nigeria) et 25 % (États-Unis) de la production de ces pays.

Les produits dérivés de l'arachide sont utilisés comme stabilisants et émulsifiants pour les produits alimentaires, dans l'industrie des plastiques et des crèmes cosmétiques, dont la crème à barbe. Les résidus de l'extraction d'huile, riches en protéines peuvent être utilisés comme engrais azotés et pour l'alimentation des animaux de ferme. Les gousses d'arachide sont une excellente source alimentaire pour engraisser les porcs qui sont parfois envoyés dans les champs pour s'alimenter directement sur place en déracinant les plantes. Les écailles des gousses sont aussi récupérées pour la confection de panneaux d'isolation thermique.

L'arachide a fait l'objet de nombreuses recherches, car elle est une bonne source de protéines et d'huile et sa croissance est bonne même sous les conditions limitantes des sols pauvres des tropiques (latosols). Les programmes d'amélioration ont permis de développer des variétés hâtives qui seraient plus adaptées aux conditions des régions tempérées où la saison favorable est plus courte et nécessite donc un développement rapide. Les Américains ont sélectionné des variétés qui peuvent être cultivées aussi au nord que l'état de Virginie. La productivité des plantes s'est beaucoup améliorée à la suite des programmes d'hybridation et de sélection réalisés après la Seconde Guerre mondiale. Les nouvelles variétés américaines peuvent produire près de 400 g de gousses (séchées) par plant, avec des productions par hectare qui atteignent les 5-8 TM de gousses, trois fois plus qu'au début du siècle. Les programmes d'amélioration génétique ont aussi produit des variétés résistantes aux bactéries (*Cercospora*), aux champignons et aux virus qui diminuent la productivité des récoltes d'arachide, particulièrement dans les régions plus humides. Les gousses d'arachide conservées sous des conditions trop humides sont susceptibles à la contamination par un champignon, *Aspergillus flavus*, qui produit des toxines (**aflatoxines**; **Figure 7**) qui peuvent causer la mort par ingestion et qui sont aussi fortement carcinogènes. Des meilleures conditions de transport et d'entreposage et un meilleur contrôle de ceux-ci, ont permis de réduire les cas de toxicité causées par ce champignon. Certaines personnes sont allergiques à la présence de protéines de réserve présentes dans les graines d'arachide (arachine et coarachine) et la consommation de cette légumineuse, même en quantités minimales, doit être proscrite pour ces personnes. La présence de l'arachide dans tous les mélanges et produits alimentaires doit être maintenant clairement indiquée pour prévenir des cas d'intoxication qui peuvent provoquer la mort s'ils ne sont pas traités rapidement.

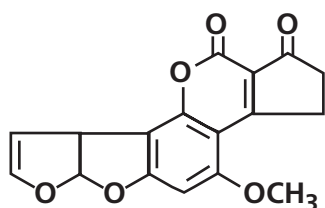


Figure 7.- Structure d'une des formes de l'Aflatoxine, toxine produite par le champignon *Aspergillus flavus* sous des conditions humides d'entreposage des fruits. Cette toxine est toxique à l'homme et est considérée un carcinogène.

Statistiques de production d'arachides pour 2001 (FAOSTAT, révisé)

La production mondiale d'arachide (en gousse) en 2001, était d'environ 34,1 MTM, répartie dans 109 pays sur une superficie proche des 25,6 millions d'hectares. Les pays producteurs les plus importants étaient: la Chine (14,6 MTM), l'Inde (6,2 MTM), le Nigeria (2,9 MTM), Les États-Unis (1,9 MTM), le Soudan (1,9 MTM), le Sénégal (1,1 MTM) et l'Indonésie (1,0 MTM). Le rendement moyen par hectare était de 1,37 TM et variait entre 4,9 TM et 0,4 TM par hectare dépendant des pays producteurs.

Le soja

De toutes les légumineuses d'importance alimentaire, le soja (*Glycine max* (L.) Merr.) est l'espèce dont le succès comme plante cultivée au cours de ce siècle est le plus spectaculaire. Dépendant des variétés, les graines de cette plante contiennent entre 30 % et 50 % de protéines. Ces protéines sont aussi proportionnellement plus riches en acides aminés soufrés que celles des autres légumineuses. De plus, les graines contiennent entre 13 % et 25 % d'huile de bonne qualité. En Chine, sa région d'origine, la plante est considérée "la viande des pauvres", tandis qu'aux États-Unis, de loin le plus important producteur mondial de soja (près de 50 % de la production mondiale), cette plante a été nommée "Cinderella crop" ou "la culture miracle". Cette espèce d'origine asiatique est, avec le riz, une des cultures traditionnelles les plus importantes des régions subtropicales et tempérées en Asie. Par contre, bien qu'introduite en Occident à partir de la fin du 17^e siècle, elle ne fût cultivée que très marginalement en Europe et en Amérique jusqu'en 1920. À cette époque, les chercheurs américains se sont intéressés à cette plante et ont développé un vaste programme d'amélioration et de sélection génétique. Comme résultat de cet effort, les productions en protéines et en huile de cette plante ont atteint des niveaux exceptionnels au cours des derniers 70 ans. Les variétés modernes de soja produisent entre 30 et 50 %

Tableau 2a.-Production de soja aux Etats Unis (FAOSTAT, Nations Unies)

- Introduit aux Etats Unis en 1765 par David Bowen.

Année	Surfaces plantées (en millions hectares)	Production (MTM)*	Production/hectare (Kg/hà)
1900	0.012	0.004	350
1924	1.35	0.8	600
1953	12.0	16.2	1.350
1968	16.8	30.1	1.800
1974	20.8	33.1	1.590
1982	28.1	59.6	2.121
1988**	23.2	42.2	1.815
2001	29.5	78.7	2,662

Millions de tonnes métriques (1 TM = 1000 Kg)

** conditions climatiques défavorables en 1988

de protéines et entre 14 et 25 % d'huiles (sur la base du poids des graines séchées) qui sont concentrées dans les cotylédons des graines. À partir de 1950, une politique généreuse de subsides agricoles aux États-Unis favorisa le remplacement de la culture de blé excédentaire par la culture du soja. À partir de cette période, la superficie des terres utilisées à cette fin et les rendements par hectare de cette légumineuse ne cessèrent d'augmenter de façon impressionnante (**Tableau 2a**), avec le résultat que la production américaine représente en 2001 près de 45 % (environ 78,7 MTM) de la production mondiale de cette légumineuse, estimée à environ 176,6 MTM. Le même phénomène s'est produit au Brésil à partir de 1955, année où la production était d'environ 370 000 TM, pour atteindre une production de 37,7 MTM en 2001 (**Tableau 2b**). Dans les pays d'Occident, le soja est utilisé principalement pour l'extraction d'huile, pour la production des dérivés dans l'industrie alimentaire et non-alimentaire et pour l'alimentation du bétail. Plus de la moitié de la production des États-Unis et du Brésil est destinée à l'exportation. Par contre en Asie, et dans certaines régions de l'Afrique, presque toute la production de soja est utilisée sur place et est apprêtée et transformée de nombreuses façons pour l'alimentation humaine directe.

Tableau 2b.- Production du Brésil (FAOSTAT, Nations Unies)

Année	Surfaces plantées (en millions d'hectares)	Production (MTM)	Production/hectare (Kg/ha)
1955	0.8	0.37	450
1970	1.3	1.51	550
1980	8.8	15.16	660
1988	10.5	18.00	1.230
2001	13.9	37.73	2.703

Description de la plante de soja :

Le soja (*Glycine max* (L.) Merr.) est une plante herbacée annuelle pubescente et érigée qui peut atteindre entre 1 m et 1 m 60 de hauteur à maturité. Les feuilles alternes sont composées et sont généralement formées de 3-5 folioles (parfois 7), dépendant des variétés. Les fleurs zygomorphes, typiques des espèces de la sous-espèce Lotoideae, sont regroupées par 3-15 (parfois jusqu'à 30) sur des racèmes courts insérés sur la tige à l'axile des feuilles. Selon la variété, la croissance peut être déterminée ou indéterminée. Les variétés à croissance déterminée produisent leurs inflorescences à l'apex des rameaux terminales, une fois la croissance végétative terminée. Ces variétés sont favorisées lorsque la récolte est mécanisée. Les variétés de croissance indéterminée produisent leurs inflorescences le long des nœuds foliaires à mesure que la plante se développe (**Figure 8**). La fécondation est cléistogame et une proportion réduite des fleurs formées produisent de 3 à 8 fruits regroupés sur chaque nœud axillaire. Les gousses sont des légumes typiques, comprimés latéralement et pubescents sur toutes leurs surfaces. Chaque gousse contient généralement entre 2 à 3 (parfois jusqu'à 5) graines globuleuses aux testas de différentes couleurs unies ou mélangées (blanches, jaunes, noires, marron, vertes, etc.). Les cotylédons de la graine accumulent les deux produits alimentaires les plus importants du soja dans des concentrations qui varient entre 30% et 50% du poids de celles-ci pour les protéines et entre 13 % et 25 % pour les huiles. Le soja est une espèce dont la photosynthèse est du type C₃.

Origine et évolution du soja :

Le soja appartient au genre *Glycine* d'origine tropicale. Ce genre est composé de quelques 280 espèces représentées par des plantes arbustives ligneuses, herbacées vivaces et annuelles ayant un nombre chromosomique de base de X = 10. Bien que le centre d'origine du genre *Glycine* soit considéré comme étant localisé en Afrique

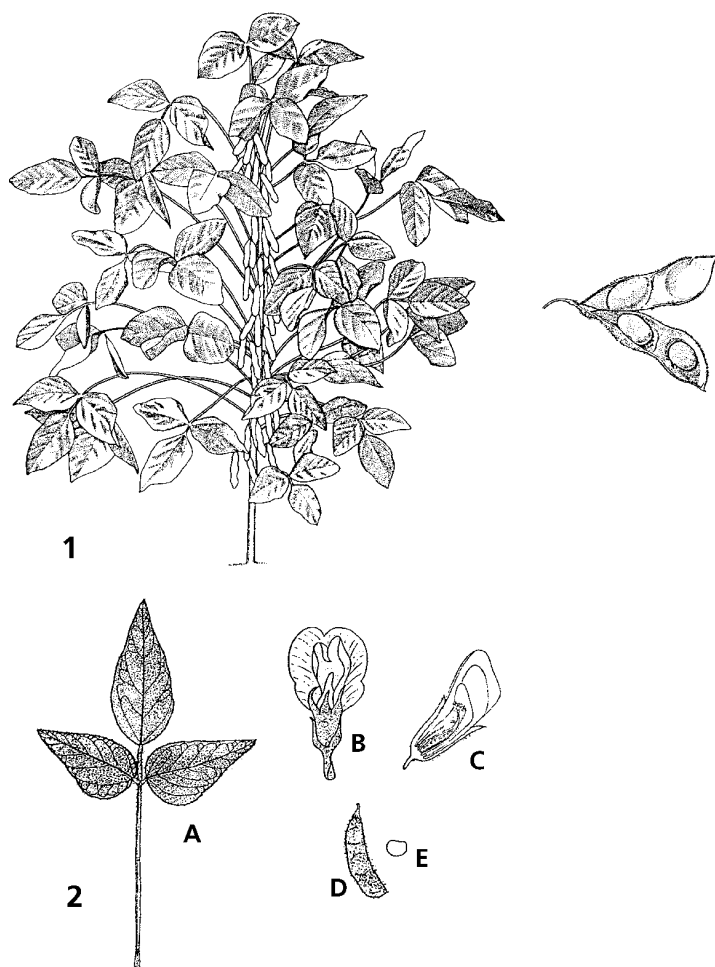
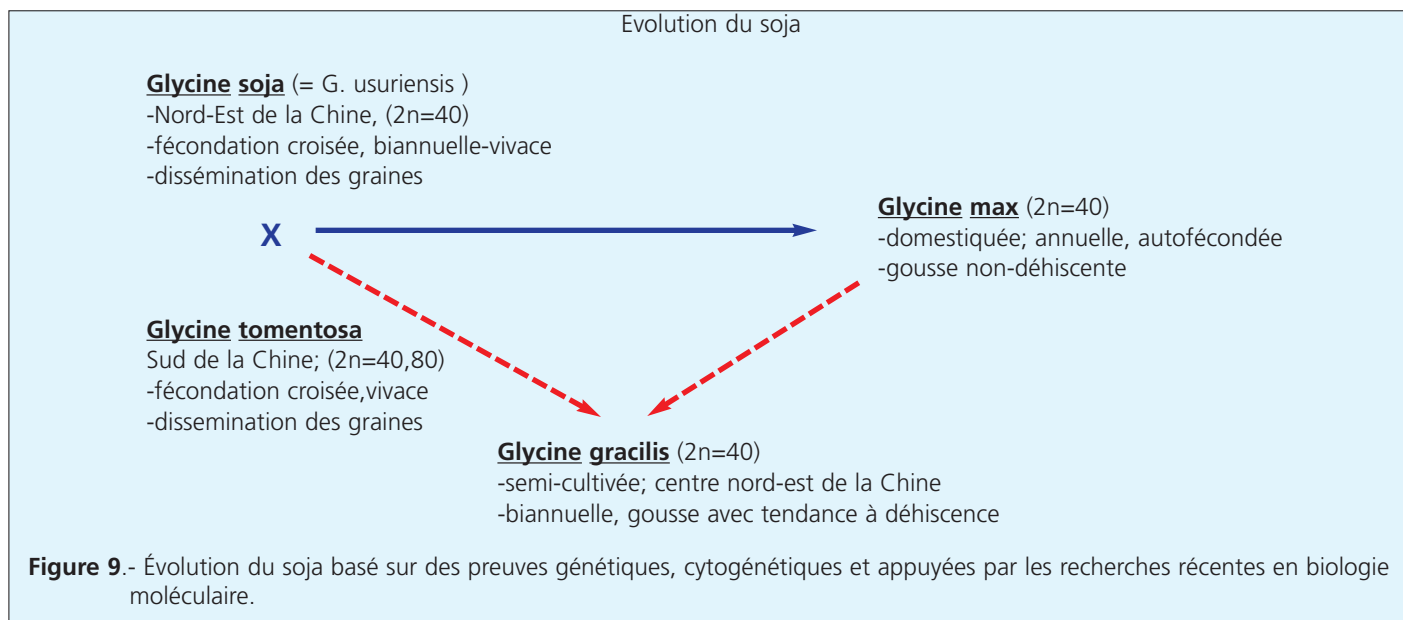


Figure 8.- Plante de soja et ses composantes. **(1)** partie aérienne d'un plant de soja du type érigé montrant les feuilles composées et les racèmes de fruits accrochés à la tige centrale et une gousse à deux graines. **(2)** feuille (A), fleur vue du dessous (B), fleur en coupe longitudinale (C), gousse (D) et graine (E) (modifié de Dovring 1974).

de l'Est, les 9 espèces du sous-genre *Soja*, auquel appartient le soja, *Glycine max*, sont distribuées sur le continent asiatique dans les régions du centre-est et nord-est de la Chine. Les analyses génétiques et cytologiques, appuyées par des preuves basées sur la biologie moléculaire, suggèrent très fortement que le soja aurait évolué à partir d'un croisement naturel entre les deux espèces de *Glycine* spontanées, *G. ussuriensis* ($2n = 40$), distribuée au centre-nord de la Chine, et *G. tomentosa* ($2n = 40, 80$), distribuée au centre-sud de la Chine. Une troisième espèce *G. gracilis* ($2n = 40$), qui présente des caractères intermédiaires entre une plante cultivée et une plante spontanée, est décrite par certains botanistes comme l'espèce ancestrale directe du soja cultivé (**Figure 9**). Par contre, d'autres experts considèrent cette espèce comme une dérivée de *G. soja* qui aurait souffert d'une réapparition (réversion) de certains caractères spontanés.

Il n'existe pas d'information archéologique qui puisse établir avec précision l'endroit et le moment où la domestication et les premières cultures de soja ont été effectuées. Les



preuves les plus anciennes sont retrouvées dans la littérature chinoise remontant au premier millénaire av. J. C. Cette plante et sa culture sont décrites pour la première fois dans le livre des Odes qui rapportent les activités et l'histoire de la dynastie Shu qui s'est développée pendant la période de 1100 à 700 années av. J.C. Du fait que le soja est rapporté dans les légendes anciennes comme étant la plante que la divinité Shen Nung avait offert aux humains pour leur apprendre à cultiver la terre, les experts ont avancé l'hypothèse que cette plante a probablement été domestiquée vers 7 000 années A.P. Il est certain, par contre, que la culture du soja s'est rapidement implantée et étendue en Chine, en Corée et au Japon à partir du commencement de notre ère. La grande diversité de formes et de variétés ainsi que l'utilisation alimentaire très variée qu'en ont fait les peuples asiatiques démontrent que la culture du soja était, avec le riz, au centre du développement agricole depuis des millénaires.

Le soja fut introduit en France par les missionnaires en 1740 et planté au Jardin des Plantes de Paris et, par la suite en 1790 au Jardin Botanique de Kew (Angleterre). Cette plante fût considérée comme une curiosité et on ne la cultiva qu'à petite échelle dans le sud de la France qu'à partir de 1908. Le soja fut introduit pour la première fois aux États-Unis par David Bowen en 1765, mais c'est seulement à partir de 1890 que l'on commence à s'intéresser à cette plante comme source alimentaire pour ces protéines et son huile. Les Américains développeront à partir de 1920 un vigoureux programme d'amélioration et de sélection à partir de l'introduction de plus de mille variétés asiatiques qui seront utilisées comme germoplasme pour les programmes d'hybridation. Le soja est maintenant cultivé dans toutes les régions subtropicales et tempérées du monde. Sa culture a permis d'améliorer les régimes alimentaires de nombreuses populations rurales dans les régions défavorisées de tous les continents.

Écologie et méthodes de culture

Cette plante est bien adaptée à des conditions climatiques variées allant des régions subtropicales aux climats tempérés relativement frais. Elle est cultivée à une altitude moyenne dans les régions intra montagneuses des tropiques et jusqu'aux latitudes 52° N et environ 44° S dans les régions tempérées et tempérées froides. La distribution suit celle du maïs et, aux États-Unis, elle est cultivée en rotation avec le maïs dans la vaste région du "corn belt". Pour sa croissance, le soja a besoin d'une saison de culture sans gels récurrents importants lors du développement des plantules et d'une fin d'été relativement sec et chaud. Sa production est favorisée sur des sols alluviaux profonds à bon drainage et de texture légère à loameux.

Le soja doit être semé au printemps sur des sols bien labourés en profondeur. Certains fermiers préfèrent planter le soja sur des sols non labourés bien drainés ("no-till sowing") afin d'éviter l'érosion des sols en surface. Les graines de soja doivent être inoculées avec la race spécifique de *Rhizobium* pour cette plante avant d'être semées dans des champs pour la première fois ou après des rotations de culture prolongées. L'ajout d'engrais riches en phosphore, en potassium et en éléments mineurs (Cobalt, Mb, S) favorisent la nodulation bactérienne et augmente la production de la récolte. Le développement végétatif de la plante est très dépendant de l'apport d'eau et des arrosages sont nécessaires quand le régime de pluies n'est pas régulier. Le contrôle des mauvaises herbes est important lors du développement initial des plantules avant que celles ci couvrent toute la surface du sol. Chez les variétés traditionnelles, la floraison est induite par le raccourcissement des journées, mais de nouvelles variétés insensibles à la photopériode ont été produites, ce qui permet deux récoltes par année lorsque l'on utilise des variétés hâtives sous certaines conditions. Les excès d'humidité doivent être évités lors de la phase de maturation des fruits, car les fleurs sont sensibles aux changements de régime hydrique et ont tendance à avorter en plus grands nombres. Dépendant des régions et des variétés utilisées, la culture de soja s'effectue sur une période saisonnière qui varie entre 3 mois, pour les régions les régions tempérées les plus froides, et 6-7 mois pour les régions subtropicales aux climats chauds et humides. En Amérique du Nord et en Europe, la culture et la récolte du soja sont très mécanisées. Des équipements spécialisés ont été développés pour cette culture et les grands moyens sont clairement démontrés lors des récoltes qui utilisent de nombreuses moissonneuses en séries. Un certain degré de mécanisation existe aussi au Japon, en Chine et dans certains pays d'Amérique du Sud comme le Brésil, l'Argentine et le Chili. Dans les autres pays du Tiers-Monde, particulièrement en Afrique, sa culture est manuelle et dépend d'une main-d'œuvre abondante.

Utilisation du soja, statistiques et amélioration génétique :

Le soja est la plante dont l'utilisation pour l'alimentation humaine est une des plus diversifiée. En Asie, presque toute la production de soja est destinée à l'alimentation humaine directe et moins de 15% de cette production est destinée à l'extraction d'huile. Les graines de soja séchées ou vertes, peuvent être consommées cuites sans autre modification. Elles peuvent aussi être germées et utilisées comme légumes dans des salades. Les graines germées ont l'avantage de produire une quantité appréciable de vitamine C (acide ascorbique), ce que n'est pas le cas pour les graines séchées de soja ou celles d'autres légumineuses. Mais dans les pays asiatiques, une grande partie de la production de graines de soja servent surtout à la préparation de nombreux produits transformés qui possèdent une excellente qualité nutritionnelle. De ceux-ci, les plus importants sont le lait de soja, le "tofu" ("dofou" en mandarin), l'"okara", le "miso" et la sauce de soja.

Pour préparer le lait de soja on trempe les graines de soja séchées dans de l'eau. Quand celles-ci sont bien imbibées d'eau, après environ 2 jours, elles sont rincées et écrasées dans de l'eau tiède. Le tout est chauffé à une température d'environ 95° C et le liquide est séparé des solides par filtration. Cette solution liquide constitue le **lait de soja** qui est utilisé comme boisson en Asie et remplace le lait pour les personnes qui ne peuvent tolérer le lactose. En Amérique du Nord et en Europe, le lait de soja est utilisé dans les formules liquides destinées aux nourrissons et enfants de bas âge qui sont aussi intolérants au lactose du lait. Le dépôt spongieux qui résulte de la préparation du lait de soja est l'**okara**, qui a la consistance d'un fromage frais et est très apprécié pour agrémenter les plats la cuisine chinoise.

Le **tofu** est préparé à partir du lait de soja qui est bouilli en présence de sels de magnésium afin de précipiter les protéines. Cette masse de protéines précipitées reçoit le nom de "**curd**". Au fur à mesure que les protéines sont précipitées elles sont comprimées à l'aide de spatules en bois afin drainer l'excès de liquide et former des blocs, le tofu, qui ont la consistance d'un fromage frais de texture fine et uniforme. Le tofu peut être consommé directement comme un fromage ou être ajouté à des plats et mets variés. L'écume produite lors de la cuisson du lait de soja est récupérée et séchée rapidement sur des plaques chauffées afin de confectionner des galettes fines ayant une texture de dentelle, le "**yuba**", qui est apprécié comme entrée ou comme dessert lorsqu'il est sucré.

Le **miso** est une préparation japonaise issue de la fermentation de graines de soja. Les graines de soja sont imbibées d'eau et sont ensuite placées dans des cuves en cèdre sur lesquelles on applique une pression continue à l'aide de poids (pierres ou galets ronds de grande dimension). Une fermentation naturelle se produit sur une période de 18 mois. La pâte fermentée, le miso, est considérée un plat très délicat auquel on confère des qualités mystiques et mystérieuses. L'Empereur du Japon possède sa propre fabrique de miso à l'intérieur de son palais et certaines recettes culinaires de la famille impériale sont considérées des secrets d'état. En Indonésie, l'on produit un produit similaire au miso, le **tempeh**, mais la période de fermentation est plus courte, de l'ordre de 2 à 4 mois.

La méthode traditionnelle suivie en Asie pour la préparation de la **sauce soja** consiste à fermenter pendant 3 mois ou plus, dans des enclos frais et à l'obscurité, des blocs d'okara, auxquels on a parfois ajouté préalablement de la farine de riz ou de blé. Pendant cette période, les champignons, dominé par la présence d'espèces d'*Aspergillus*, produisent une croûte sur toute la surface des blocs d'okara. La couche de champignons est grattée des blocs et celle-ci est trempée pendant plusieurs jours dans de l'eau salée. Le liquide filtré constitue la sauce soja et les blocs d'okara sont lavés et nettoyés sur leur surface et sont consommés de la même façon que des fromages. La sauce soja produite dans les pays occidentaux n'est, dans la plupart des cas, qu'une pâle imitation de celle produite en Asie. Elle est généralement préparée à partir de mélanges d'extraits de graines de soja non fermentées et d'eau salée auxquels l'on ajoute un colorant artificiel, un extrait de levure, du caramel et un extrait aromatique.

Par contraste à la situation en Asie, une proportion importante de la production de soja américaine et

européenne est utilisée pour la production d'huile de consommation alimentaire et pour diverses industries et les résidus issus de cette extraction sont destinés à l'alimentation des animaux de ferme. En 2001, on a estimé que plus de 95 % de la récolte de graines de soja aux États-Unis (environ 70 Millions TM) et 60 % de celle du Brésil (environ 20 MTM) étaient destinées à la production d'huile.

Avant d'extraire l'huile des graines de soja, celles-ci doivent être séchées et nettoyées. Il est important que les graines ne soient pas exposées à l'humidité pendant l'entreposage, car elles pourraient être infectées par le champignon *Aspergillus flavus* qui, comme pour l'arachide, produit des toxines mortelles (aflatoxines). Les cotylédons riches en huile, sont coupés mécaniquement et macérés dans des séries de solvants organiques qui séparent et isolent l'huile des autres composantes de la graine. Le processus de raffinage et de purification de l'huile implique aussi des traitements successifs pour éliminer les gommages végétales et des résidus organiques qui pourraient donner un goût non désirable à l'huile. La dernière étape utilise des agents de décantation et de « blanchissement » pour éliminer toute turbidité et coloration excessive à l'huile. L'huile de soja est considérée comme une huile de qualité, car elle est stable et n'a pas de goût. De plus, elle possède un taux élevé d'antioxydants naturels (principalement du tocoférol) ce qui permet un entreposage prolongé même si les taux d'acides gras insaturés sont élevés. Plus de 60 % de l'huile destinée à l'alimentation en Amérique du Nord provient du soja. Elle est utilisée pour la fabrication de la margarine, pour assaisonner les salades, pour la friture et la cuisson d'aliments, pour la préparation de crèmes artificielles, mélanges pour gâteaux, etc. Une partie de la production d'huile américaine et européenne, estimée entre 12 % et 20 %, est aussi utilisée dans l'industrie des plastiques, des peintures, des laques et des adhésifs pour colles, pour améliorer la flexibilité des trois premiers produits et augmenter le pouvoir adhésif des colles.

Un des produits dérivés de l'extraction d'huile est la lécithine, qui est utilisée dans l'industrie alimentaire pour préserver le goût des aliments, comme agent dispersant des mélanges liquides et des boissons non alcoolisées et comme "adoucisseur" dans la préparation des crèmes glacées, mélanges de gâteaux, etc.

Contrairement aux caryopses et parties végétales des céréales, qui peuvent être consommés directement par les animaux de ferme, le soja doit être soumis à un traitement préalable. Toutes les parties de la plante de soja contiennent un taux assez élevé d'un inhibiteur de la trypsine, un enzyme nécessaire à la digestion des protéines et qui est présent dans le tube digestif des animaux, incluant l'homme. C'est seulement vers 1920 que l'on a découvert que cet inhibiteur était inactivé par des températures élevées, proches du point d'ébullition. A la suite de cette découverte un traitement fut développé afin de pouvoir utiliser le soja comme source de supplément protéinique pour l'alimentation des animaux de ferme. A partir de ce moment, la culture du soja prit un essor considérable qui fut encouragé de façon indirecte, à partir de 1950, par une politique agricole gouvernementale très favorable à l'expansion des terres agricoles destinées à cette culture du fait que les fermiers étaient pénalisés s'ils cultivaient le blé et d'autres céréales dont les productions étaient considérées excédentaires. Les résidus riches en protéines (75-85 %) issus de l'extraction d'huile du soja, et parfois du broyage direct des graines, sont soumis à des températures proches du point d'ébullition afin d'inactiver l'inhibiteur de la trypsine. Par la suite, cette pâte est compactée et séchée pour confectionner des tourteaux qui sont ajoutés aux moulées destinées aux animaux de ferme, en particulier les porcs et la volaille.

Les graines de soja, mais non les tourteaux issus de l'extraction d'huile, sont aussi utilisées pour produire une protéine végétale texturée (PVT) qui peut être préparée et apprêtée sous la forme d'un substitut de viande ou ajoutée comme additif aux préparations de viandes en conserve et aux saucisses. Plusieurs aliments secs pour chiens et chats contiennent des pourcentages élevés (jusqu'à 75% de leur poids) de la protéine de soja ainsi que des produits dérivés de graines de céréales.

Un Américain célèbre pour ses voitures, Henry Ford, contribua à faire connaître le soja pendant la période de la grande dépression entre les deux guerres mondiales. Il fit construire trois fabriques dans les années 1930 destinées à l'extraction d'huile de soja qui fut utilisée dans l'industrie des plastiques, peintures, émaux et des laques. Ford lui-même mangeait du soja à chaque repas et se fit faire un costume en fibres de protéines (aldril) de soja. En 1940, il présenta une voiture dont la carrosserie avait été construite d'un plastique très résistant

En Amérique du Nord, le soja joue un rôle important dans la confection et fabrication d'un grand nombre de produits alimentaires et industriels, tel qu'illustré dans une de ces toiles par l'artiste américain James Gurney (**Figure 10**).



Le soja serait certainement un bon candidat pour améliorer l'alimentation des populations les plus démunies du Tiers-Monde. Malheureusement, l'accès à cette plante dans ces régions est encore très limité. Bien que la culture du soja ait été introduite dans un grand nombre de pays tropicaux, elle n'a pas eu le succès escompté dans ces régions. Dans les quelques pays du Tiers-Monde où la culture du soja s'est implantée, la quasi-totalité de la production est exportée afin d'obtenir de précieuses devises et les populations locales ne peuvent profiter de cette plante pour corriger les déficiences protéiniques qui les affectent.

La production mondiale de soja en 2001 était de 176,6 MTM, répartie dans 83 pays sur une superficie d'environ 75,5 millions d'hectares. Les pays producteurs les plus importants étaient les États-Unis (78,7 MTM), le Brésil (37,7 MTM), l'Argentine (26,7 MTM), la Chine (15,4 MTM), l'Inde (5,6 MTM), le Paraguay (3,6 MTM), **le Canada (2,0 MTM)** et l'Italie (0,9 MTM). Le rendement moyen par hectare était de 2,3 TM. Certains pays comme l'Italie et l'Éthiopie produisaient un rendement supérieur à 3,9 TM/ha, les États-Unis et le Canada suivent avec en rendement d'environ 2,7 TM/Ha et l'Inde, le Sri Lanka et Myanmar avaient un rendement moyen inférieur à 0,8 TM/ha.